

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Construção de um Hexacóptero para Missões Autónomas

Filipe Mendes Lopes



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Especialização em Automação**

Orientador: Prof. Doutor Joaquim Gabriel Mendes

Co-orientador: Prof. Doutor Manuel Romano Barbosa

2 de Setembro de 2018

Construção de um Hexacóptero para Missões Autônomas

Filipe Mendes Lopes

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Especialização em Automação

Resumo

Os drones estão cada vez mais acessíveis ao público, existindo atualmente no mercado soluções standard, vocacionadas sobretudo para aquisição e transmissão de imagem, nomeadamente realização de vídeo e fotografia, e aplicações *first person view*. Por outro lado, dada a possibilidade de instalação de instrumentação e de sistemas de processamento de informação, tornou-se possível desenvolver sistemas autónomos para objetivos específicos, integrando tecnologia *of-the-shelf*.

Nos últimos anos, pelas mais diversas razões, o número de ocorrências que requer a localização e resgate de pessoas em ambientes terrestre ou aquático tem vindo a aumentar. As operações recorrem tipicamente a meios humanos e materiais mais ou menos convencionais, sendo que, muitas vezes, a utilização de meios aéreos é a única solução. Porém, os meios aéreos empregues têm associado um tempo de resposta e um custo elevados, pelo que o desenvolvimento e utilização de meios alternativos, capazes de operar com reduzida intervenção humana, elevada prontidão e baixo custo são uma necessidade.

Neste trabalho é desenvolvida uma aeronave não tripulada baseada em drone, vocacionada para missões de busca e salvamento. A aeronave é capaz de realizar missões pré-definidas, de forma autónoma, ou com intervenção remota do piloto. Assim, para além da capacidade de controlo do voo, o sistema pode capturar e transmitir informação diversa para uma estação terrestre, nomeadamente imagem. O operador apenas tem de intervir no planeamento da missão, na interpretação da informação recolhida pelo veículo e no processo de tomada de decisão.

Após uma especificação dos requisitos necessários para o cumprimento das missões alvo, foi definida a plataforma de voo a usar, o número de motores e a sua configuração. Tendo em conta estas definições e uma estimativa inicial da carga a transportar, foi efetuado o dimensionamento dos motores. A solução final decorre de um processo iterativo, uma vez que a escolha de cada elemento condiciona os restantes. Posteriormente, foi escolhido o sistema de controlo de voo, a comunicação e a interface com o piloto. Foi selecionado e parametrizado o software de comando e, finalmente, foi feita uma avaliação experimental do sistema.

A solução desenvolvida cumpre os objetivos delineados, sendo de baixo custo, flexível, modular e expansível. Estas características abrem caminho a novos desenvolvimentos como, por exemplo, à possibilidade de instalação *on board* de um computador (e.g., um Raspberry Pi) capaz de processar informação diversa e tomar decisões em tempo real, sem intervenção da estação de terra.

Palavras chave: drone; aeronave não tripulada; hexacóptero; controlador de voo; voo autónomo.

Abstract

In the last few years, drones become accessible to the public, and standard solutions are nowadays available on the market, primarily for image acquisition and transmission, such as video and photography, and first person view applications. On the other hand, given the possibility of installing different sensors and information processing systems, it is now possible to develop autonomous systems for specific purposes by integrating of-the-shelf technology.

In recent years, for a variety of reasons, the number of occurrences that require locating and rescuing people in terrestrial or aquatic environments has been increasing. The operations typically rely on more or less conventional human and material resources, and the use of aerial means is often the only solution. However, due to the high response time and cost that characterize standard aerial vehicles, the development of alternative solutions, capable of operating with reduced human intervention, high readiness and low cost is of paramount importance.

In this work an unmanned drone-based aircraft is developed, aimed at search and rescue missions. The aircraft is capable of performing pre-defined missions either autonomously or with remote pilot intervention. Thus, in addition to the ability to control the flight, the system can capture and transmit information to a ground station, namely image. The operator only has to intervene in the planning of the mission, in the interpretation of the information collected by the vehicle, and in the decision-making process.

After specifying the requirements necessary to fulfil the target missions, the drone flight platform, the number of engines, and their configuration were defined. Taking into account these definitions and an initial estimate of the payload, the engines were dimensioned. The final solution stems from an iterative process, since the choice of each element conditions the rest. Subsequently, the flight control system, the communications, and the interface with the pilot were chosen. The command software was selected and parametrized and, finally, an experimental evaluation of the system was made.

The solution developed fulfils the objectives outlined, being low cost, flexible, modular and expandable. These characteristics open the way to new developments, such as the possibility of installing a computer (e.g. a Raspberry Pi) capable of processing information captured by the drone and making real-time decisions without ground station intervention.

Keywords: drone; unmanned aircraft systems; hexacopter; flight controller; autonomous flight.

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Joaquim Gabriel M. Mendes e Prof. Manuel Romano Barbosa, pelo apoio e disponibilidade manifestados ao longo da realização deste trabalho.

Ao meu irmão António, pela ajuda e apoio constantes ao longo deste trabalho. À minha cunhada Rosário, pelo incentivo em abraçar este desafio. À minha esposa Filipa e à minha filha Mariana, pela paciência que tiveram nos fins de semana em que não estive tão presente. Aos meus pais que me têm acompanhado ao longo da vida.

Filipe Mendes Lopes

Conteúdo

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do Projeto e Motivação	2
1.2 Objetivos do Projeto	3
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Tipos de drones	5
2.1.1 Asa fixa	6
2.1.2 Asa rotativa	6
2.1.3 Micro, nano e pico drones	6
2.1.4 <i>Smart dust</i>	7
2.1.5 Bio-drones	7
2.2 Campos de aplicação	7
2.2.1 Proteção ambiental	8
2.2.2 Distribuição e logística	9
2.2.3 Exploração espacial	9
2.2.4 Exploração marítima	12
2.2.5 Agricultura	12
2.2.6 Construção civil	13
2.2.7 Busca e salvamento	13
2.2.8 Outras aplicações	14
2.3 Áreas de desenvolvimento	15
2.3.1 Materiais e processos de fabrico	16
2.3.2 Fonte de energia e atuação	16
2.3.3 Controlo	16
2.4 Soluções existentes no mercado	17
2.4.1 Jiang Innovations Science and Technology (DJI)	18
2.4.2 Yuneec	19
2.4.3 Parrot	19
2.4.4 Autel Robotics	20
3 Solução de hardware	23
3.1 Especificações da plataforma de voo	23
3.2 Acionamento	28

3.2.1	Hélices	29
3.2.2	Motores DC <i>brushless</i>	32
3.2.3	Controladores de velocidade	32
3.2.4	Baterias	33
3.2.5	Cálculo do acionamento	35
3.3	Controlador de voo	39
3.3.1	Seleção do controlador	40
3.4	Aquisição e transmissão de vídeo	41
3.5	Comunicações	44
3.6	Construção do modelo	45
4	Software de comando	51
4.1	Seleção de software da estação de controlo de terra	51
4.2	<i>APM Planner 2.0</i>	53
4.2.1	Informação do menu principal	54
4.2.2	Instalação do <i>firmware</i>	55
4.2.3	Configuração da geometria do drone	56
4.2.4	Inicialização do rádio e da IMU	57
5	Testes experimentais	61
5.1	Voos de ensaio	61
5.2	Ensaio com voo radio controlado	62
5.3	Ensaio com voo autónomo	63
6	Conclusão e trabalhos futuros	69
6.1	Conclusões	69
6.2	Desenvolvimentos futuros	69
	Bibliografia	71

Lista de Figuras

2.1	Drones de asa fixa (https://www.questuav.com/media/case-study/fixed-wing-versus-rotary-wing-for-uav-mapping-applications/).	6
2.2	Drones de asa rotativa (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	7
2.3	Micro-, nano- e pico-drones (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	8
2.4	O conceito de <i>smart dust</i> (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	9
2.5	Exemplos de bio-drones (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	10
2.6	Drones em operações de vigilância e proteção ambiental (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	11
2.7	Missões de entrega de encomendas com drones (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	11
2.8	Aplicações de drones em exploração espacial (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	12
2.9	Aplicações de drones em exploração marítima (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	12
2.10	Aplicações de drones em agricultura (http://agri.ckcest.cn/ass/NK006-20160418005.pdf).	13
2.11	Aplicações de drones na construção civil (Daftry et al., 2015).	14
2.12	Drones para missões de busca e salvamento (Daftry et al., 2015).	15
2.13	Aplicações de drones menos convencionais (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	15
2.14	Drones movidos a energia solar (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	17
2.15	Frota de drones a trabalhar em cooperação (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).	18
2.16	Drone Phantom 4 Pro da DJI (https://www.dji.com/).	19
2.17	O Typhoon H 4k e o Yuneec Breeze (http://us.yuneec.com/).	20
2.18	O Bebop 2 Drone e o Parrot Disco FPV (https://www.parrot.com/pt/en/).	21
2.19	O X-Star Premium Drone da Autel (https://www.autelrobotics.com/).	22
3.1	Helicóptero modelo Blade 120 (https://www.bladehelis.com/).	24
3.2	Atitude (<i>pitch</i>), rolamento (<i>roll</i>) e deriva (<i>yaw</i>) (https://bayesianadventures.wordpress.com/).	25
3.3	Diferentes tipos de configuração para multi rotores (https://theuavguide.com/).	26
3.4	Plataforma modelo Tarot 680 Pro.	27
3.5	Placas centrais do <i>kit</i> : fibra de carbono e PCB.	28
3.6	Distribuição da alimentação elétrica pela placa de PCB.	29
3.7	Exemplo de motor de combustão interna.	30
3.8	Comparação de motores de combustão interna vs elétrico.	30
3.9	Escoamento num perfil alar.	31
3.10	Representação esquemática do movimento da hélice.	31
3.11	Variação do passo ao longo do comprimento da hélice.	31
3.12	Motor elétrico DC sem escovas.	33

3.13	ESC para motor DC sem escovas.	33
3.14	Diagrama simplificado de um ESC.	34
3.15	Exemplos de baterias LiPo.	34
3.16	<i>Power module</i>	35
3.17	Representação do impulso gerado na hélice.	36
3.18	Resumo obtido com a ferramenta de cálculo (I).	39
3.19	Resumo obtido com a ferramenta de cálculo (II).	39
3.20	Controlador de voo Naza da DJI.	40
3.21	Acelerómetro Sparkfun ADXL345.	41
3.22	Controlador de voo HKPilot 32.	42
3.23	Informação de telemetria sobreposta à imagem de vídeo.	43
3.24	Exemplo de um estabilizador de imagem profissional.	43
3.25	Estabilizador de imagem Tarot T-2D.	44
3.26	Representação esquemática das comunicações sem fios.	45
3.27	Portas de ligação do controlador HKPilot 32.	46
3.28	Representação esquemática da ligação entre componentes.	46
3.29	Soldadura da cablagem de potência e passagem de cabos de sinal.	47
3.30	Posicionamento dos ESCs na parte inferior dos braços, por baixo dos motores.	47
3.31	Posicionamento e ligação dos motores.	48
3.32	Visão geral do drone sem eletrónica.	48
3.33	Vista geral dos sistemas de comunicação.	49
3.34	Drone completo e pronto a voar.	49
4.1	<i>DJI Ground Station Software</i>	52
4.2	Planeamento de trajetória com UgCS.	52
4.3	Menu inicial do <i>APM Planner 2.0</i>	53
4.4	Áreas do menu principal do <i>APM Planner 2.0</i>	54
4.5	Ligação do <i>APM Planner 2.0</i> ao Pixhawk por USB.	55
4.6	Ligação do <i>APM Planner 2.0</i> ao Pixhawk por radio frequência 433 MHz.	56
4.7	Instalação do <i>firmware</i> no Pixhawk via USB.	56
4.8	Instalação do <i>firmware</i> concluída.	57
4.9	Configuração do frame e motores.	57
4.10	Configuração do tipo de drone no <i>APM Planner</i>	58
4.11	Canais do rádio transmissor.	59
4.12	Atribuição de canais do transmissor.	59
4.13	Inicialização do acelerómetro.	60
5.1	Pista do LIPA.	61
5.2	Visão geral dos equipamentos utilizados para a realização dos voos de teste.	62
5.3	Gráfico da altitude do drone, corrente e tensão da bateria em função do tempo.	62
5.4	Ajuste da sensibilidade de resposta aos comandos do transmissor rádio.	63
5.5	Exemplo do planeamento de um voo autónomo na estação de terra.	64
5.6	Exemplo do planeamento de varrimento de uma área.	65
5.7	Gráfico da variação da altitude em voo completamente autónomo.	65
5.8	Voo pairado a 5 m de altitude.	66
5.9	Voo pairado a 40 m de altitude.	66
5.10	Valores parametrizados para os PIDs da atitude, rolamento e deriva.	67
5.11	Exemplo de uma trajetória no Google Earth.	67

Lista de Tabelas

3.1	Comparação entre modelos de avião de asa fixa e de asa rotativa.	24
3.2	Principais diferenças entre os helicópteros e os modelos multi rotores.	25
3.3	Comparação entre diferentes configurações de multi rotores.	27
3.4	Especificações iniciais.	36
3.5	Resumo do cálculo do impulso.	38
3.6	Resumo dos componentes selecionados.	38
3.7	Características HKPilot 32, baseado no hardware Pixhawk.	42
3.8	Frequências utilizadas para comunicação sem fios.	45
3.9	Ligações por cabo ao controlador HKPilot 32.	45
4.1	Características do conjunto transmissor/recetor.	58
4.2	Atribuição de valores PWM aos canais do transmissor.	58

Abreviaturas e Acrónimos

DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DJI	<i>Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co. Ltd.</i>
EEG	<i>Eletroencefalograma</i>
EPROM	<i>Erasable Programmable Read-only Memory</i>
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
LiPo	<i>Lithium-ion polymer battery</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
NiCd	<i>Nickel-cadmium battery</i>
OSD	<i>On Screen Display</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
UgCS	<i>Universal ground Control Software</i>

Capítulo 1

Introdução

Um veículo aéreo não tripulado, vulgarmente designado por drone, consiste num sistema capaz de realizar um voo controlado remotamente, ou de forma autónoma. Como definição mais alargada, o departamento de defesa dos Estados Unidos (<https://www.defense.gov/UAS/>) refere que um drone é um veículo aéreo motorizado, que não transporta nenhum operador humano, utiliza forças aerodinâmicas para gerar sustentação, pode voar por controlo remoto ou autonomamente, e pode transportar uma carga letal ou de natureza diferente.

A utilização de drones de forma regular teve início nos anos 90 na indústria militar, com o objetivo de levar a cabo missões de reconhecimento a grande altitude.

Nos últimos anos, a utilização de drones tem vindo a passar do exclusivo militar para as mais diversas utilizações civis, em distintos ambientes e com diferentes objetivos. Esta transição foi em boa parte impulsionada pelo aparecimento dos *smartphones* e pela sua rápida e crescente aceitação no mercado. Tal facto impulsionou na indústria o desenvolvimento de instrumentação mais pequena, mais leve, com menor consumo energético e, sobretudo, com menor custo. Assim, acelerómetros, giroscópios, magnetoscópios, barómetros, GPS (*Global Positioning System*) e câmaras de vídeo, por exemplo, tornaram-se elementos banais, embebidos em quase todos os telemóveis de uso corrente. Tal evolução tecnológica permitiu o acesso generalizado a equipamento que foi sendo integrado em sistemas de voo por radio controlo, numa primeira fase, e em drones, mais recentemente.

A maior parte dos sistemas comerciais disponíveis atualmente explora a utilização de vídeo e fotografia, em aplicações como mapeamento de terreno e edifícios, inspeção a estruturas (e.g., pontes e linhas de transmissão de energia), patrulhamento de fronteiras, monitorização de culturas agrícolas, e busca e salvamento. Todas estas aplicações têm por base a utilização de um sistema controlado por um piloto, com recurso a um emissor/recetor por radiofrequência, complementado por um sistema de controlo de piloto automático. Por outro lado, existem aplicações na área da logística, para entrega de bens de pequena dimensão, baseados em sistemas completamente autónomos. Um exemplo é o serviço de entrega de encomendas da Amazon (<https://www.amazon.com/>), já disponível em várias cidades norte americanas.

A rápida redução de preços tem levado a um crescimento exponencial do número de drones.

Um relatório recente elaborado pela Goldman Sachs (<https://www.goldmansachs.com/our-thinking/technology-driving-innovation/drones/>) prevê que o total de gastos com drones em todo o mundo seja de mais de 100 mil milhões de dólares até 2020. O setor da defesa continuará a ser o mais importante, com um total de mais de 70 mil milhões de dólares de investimento em drones entre 2016 e 2020. No setor não militar, a construção, com 11 mil milhões de dólares de investimento, e a agricultura, com 6 mil milhões de dólares, representarão nos próximos anos cerca de 80% do total gasto em drones.

Alguns desafios que se colocam atualmente à utilização e ao desenvolvimento de drones são o aperfeiçoamento da legislação (Smith, 2015), normalização (Custers, 2016; Sekander et al., 2018) e questões tecnológicas, como sensorização, fusão sensorial, controlo partilhado, controlo distribuído e gestão de múltiplos veículos (Chabot, 2018; Santos et al., 2017; Merino et al., 2005; Cho et al., 2017; Hoffmann et al., 2011; Guerriero et al., 2014).

1.1 Enquadramento do Projeto e Motivação

Os drones estão hoje em dia acessíveis ao público de forma generalizada. Por um lado, existem no mercado soluções standard, vocacionadas sobretudo para aquisição e transmissão de imagem, nomeadamente para realização de vídeo e fotografia, e aplicações *first person view*. Por outro lado, dada a possibilidade de instalação de diversos sistemas de instrumentação e medida, bem como de capacidade de processamento, é possível desenvolver sistemas autónomos para objetivos específicos, integrando tecnologia *of-the-shelf* existente no mercado.

Segundo o relatório de atividades de 2017 da Autoridade Nacional de Proteção Civil (2017), mais de 130 milhões de pessoas necessitaram de assistência humanitária no ano de 2016, em todo o mundo, devido a diferentes tipos de emergências complexas, desde conflitos armados a catástrofes naturais. Os sismos e os fenómenos meteorológicos extremos foram os eventos com maior impacto.

Num outro plano, pelas mais diversas razões, o número de ocorrências que requer a localização e resgate de pessoas em ambiente terrestre e aquático tem vindo a aumentar. As operações recorrem tipicamente a meios humanos e materiais mais ou menos convencionais, nomeadamente veículos terrestres, embarcações, meios aéreos, e operacionais apeados. Muitas vezes os locais são de difícil acesso, sendo que utilizar meios aéreos é, praticamente, a única solução. Porém, os meios aéreos convencionais têm um tempo de resposta e custo bastante elevado, pelo que o desenvolvimento e utilização de meios capazes de operar com reduzida intervenção humana, em ambientes hostis, com elevada prontidão, e com custo reduzido são uma necessidade.

Neste trabalho é proposto um equipamento baseado em drone, vocacionado para missões de busca e salvamento. O sistema terá baixo custo e elevada capacidade de resposta, possuindo uma autonomia de voo razoável e uma reduzida necessidade de supervisão do operador. Ou seja, o operador será libertado da tarefa de controlo de movimento do drone, apenas intervindo no planeamento da missão, na interpretação da informação recolhida pelo veículo e no processo de tomada de decisão.

1.2 Objetivos do Projeto

O principal objetivo deste trabalho consiste na construção de uma aeronave não tripulada, capaz de realizar missões pré-definidas, de forma autónoma, ou com intervenção remota do utilizador. Para além da capacidade de controlo do voo, o sistema deverá capturar e transmitir informação diversa para uma estação de terra, nomeadamente imagem. O drone estará particularmente vocacionado para realizar missões de busca e salvamento, devendo ser uma solução de baixo custo, flexível, expansível e modular, capaz de localizar pessoas em diferentes condições ambientais.

Assim, depois de uma especificação dos requisitos necessários para o cumprimento das missões, é definida a plataforma de voo a usar, o número de motores e a sua configuração. Tendo em conta estas definições e uma estimativa inicial da carga a transportar, é necessário calcular a potência a instalar. A solução final decorre de um processo iterativo, uma vez que a escolha de cada elemento condiciona os restantes. Esta tarefa envolve principalmente:

- definição do diâmetro máximo das hélices tendo em conta a plataforma escolhida;
- determinação do tamanho do motor, potência, corrente máxima e velocidade de rotação;
- seleção dos controladores de velocidade (*electronic speed controller*, ESC) adequados à corrente consumida pelos motores;
- dimensionamento das baterias de modo a garantir a corrente máxima e a capacidade.

Posteriormente é selecionado o sistema de controlo de voo, a comunicação e a interface com o utilizador. É escolhido e parametrizado o software de comando e, finalmente, é feita uma avaliação experimental do sistema.

Nos capítulos seguintes são descritas detalhadamente todas as tarefas aqui elencadas de forma sucinta.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente documento está organizado em 6 capítulos, conforme descrição:

- Capítulo 1 – Introdução – Apresenta-se o tema da dissertação, motivação, enquadramento e objetivos que se pretendem alcançar;
- Capítulo 2 – Estado da Arte – É apresentada uma breve contextualização do assunto e algumas soluções existentes no mercado, com ênfase nas suas características e campo de aplicação;
- Capítulo 3 – Solução de hardware – Apresentam-se as especificações e requisitos do sistema, a escolha e integração dos diferentes componentes mecânicos, elétricos e eletrónicos, resultando na construção da aeronave. É ainda apresentado o sistema de controlo de voo, a comunicação e a interface com o utilizador;

- Capítulo 4 – Software de comando – É apresentado e parametrizado o software de comando;
- Capítulo 5 – Testes experimentais – São reportados os resultados práticos obtidos em voos de ensaio;
- Capítulo 6 – Conclusão e trabalhos futuros – Apresentam-se as principais conclusões obtidas a partir da realização deste trabalho, mencionando-se também alguns possíveis trabalhos a realizar no futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

Os veículos aéreos não tripulados, habitualmente conhecidos por drones, eram tradicionalmente usados por militares de países como os EUA, o Reino Unido e a Austrália, em operações de vigilância em zonas de conflito armado ou potencial instabilidade política ([Aslam, 2011](#)). Porém, na última década, a extensão do uso de drones a aplicações não militares cresceu exponencialmente. A expansão do uso doméstico foi tal, que gerou preocupação pública e debate principalmente em torno de questões de segurança e privacidade ([Luppicini e So, 2016](#)).

Atualmente, verifica-se uma necessidade crescente de voar com drones, com diversas capacidades, para aplicações civis e militares. Há também um interesse significativo no desenvolvimento de novos drones que possam voar autonomamente em diferentes ambientes e locais e sejam capazes de realizar várias missões. Na última década, o amplo espectro de aplicações destes sistemas recebeu grande atenção, o que levou ao aparecimento de vários tipos de drones, com autonomias, tamanhos e pesos diferentes. O atual estado da arte cobre desde os veículos aéreos não tripulados com controlo remoto, até às frotas autónomas e inteligentes, em áreas de aplicação tradicionais e emergentes. Desafios de projeto e fabricação de micro drones, métodos para aumentar a sua resistência, e várias abordagens de navegação e controlo, são atualmente tópicos de investigação ([Hassanalian e Abdelkefi, 2017a](#)).

Neste capítulo são apresentados alguns desenvolvimentos recentes e algumas soluções existentes no mercado, com ênfase nas suas características principais e campo de aplicação.

2.1 Tipos de drones

Os drones existentes variam muito em termos da sua configuração, do tipo de plataforma, do tamanho e da missão. Existem diferentes classificações com base em diferentes parâmetros ([Watts et al., 2012](#); [Brooke-Holland, 2012](#); [Arjomandi et al., 2006](#)). Entre eles, incluem-se peso, envergadura, carga, alcance, altitude máxima, velocidade, resistência e custo.

De seguida apresentam-se alguns tipos de drones que, pelas suas características, são considerados mais relevantes no contexto deste trabalho.

2.1.1 Asa fixa

Os sistemas de asa fixa (Fig. 2.1) são constituídos, geralmente, por uma asa rígida, fuselagem e caudas. Usam um motor e hélices como sistema de propulsão e podem cobrir uma ampla gama de possíveis ambientes operacionais, incluindo terra e mar (Hassanalian e Abdelkefi, 2017b). Devido às suas pequenas dimensões, os veículos de asa fixa são bastante difíceis de detetar por radar. Além disso, pela sua simplicidade, tipicamente têm um menor custo de produção e de manutenção.



Figura 2.1: Drones de asa fixa (<https://www.questuav.com/media/case-study/fixed-wing-versus-rotary-wing-for-uav-mapping-applications/>).

2.1.2 Asa rotativa

As principais vantagens dos drones de asa rotativa consistem na sua elevada manobrabilidade e na capacidade de poderem pairar (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a). Estas características tornam-nos ideais para o levantamento em áreas de difícil acesso, como tubulações e estruturas complexas. Os veículos são semelhantes a helicópteros, gerando sustentação a partir da rotação das pás dos rotores. Existem drones de um a doze motores (Fig. 2.2), sendo os quadrotores e os hexarotores os mais comuns.

2.1.3 Micro, nano e pico drones

Recentemente surgiu um interesse crescente pelos micro-, nano- e pico-veículos aéreos. Trata-se de drones extremamente pequenos e leves, com um comprimento máximo de 150 mm e uma massa inferior a 50 g (Petricca et al., 2011). Esses tipos de drones têm um alcance inferior a 1 km e uma altitude máxima de voo em torno de 100 m (Petricca et al., 2011). Existem diferentes configurações de asa fixa, asa rotativa e asa do tipo borboleta. Alguns exemplos de micro-, nano- e pico-drones são mostrados na Fig. 2.3.



Figura 2.2: Drones de asa rotativa (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).

2.1.4 Smart dust

O conceito de *smart dust* surgiu de estudos da *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), EUA, em 1990 (Palattella et al., 2013). O *smart dust* consiste em múltiplos agentes, equipados com um ou mais sensores, uma fonte de alimentação, um circuito analógico, uma comunicação bidirecional e um microprocessador programável (Song, 2002; Hassanalian e Abdelkefi, 2017a). Dependendo da fonte de energia, que pode ser baseada em células solares ou baterias, o tamanho dos agentes pode variar de 1 a 3 mm (Hsu et al., 1998). Os sensores podem ser acústicos, de vibração ou magnéticos, podendo ser dispersados nas áreas alvo por veículos aéreos não tripulados. Recentemente, tem havido um esforço para incorporar sensores químicos e biológicos. Na Fig. 2.4 está esquematizado o conceito de *smart dust*.

2.1.5 Bio-drones

Existem diferentes técnicas para o design e fabricação de pequenos drones. Uma delas usa aves ou insetos, mortos ou vivos. No primeiro caso, o corpo do animal é usado apenas como plataforma. No segundo, além de plataforma, a ideia é controlar o comportamento da ave ou inseto, de modo a que os animais cumpram as missões pretendidas (Sato e Maharbiz, 2010). Na Fig. 2.5 estão representados alguns bio-drones que ilustram estes conceitos.

2.2 Campos de aplicação

São inúmeros os campos de aplicação dos drones, quer militares, quer civis. De seguida apresenta-se uma seleção de casos considerados mais relevantes.



Figura 2.3: Micro-, nano- e pico-drones (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).

2.2.1 Proteção ambiental

Os drones são cada vez mais usados para realizar ações ambientais, como na administração de parques e terrenos agrícolas, monitorização da vida selvagem em diferentes áreas, observação dos efeitos das mudanças climáticas, e monitorização da biodiversidade em diferentes ecossistemas, desde florestas tropicais a oceanos (Tang e Shao, 2015; Cantero et al., 2015). Podem também ser usados para o reconhecimento e investigação de desastres naturais, incluindo incêndios florestais, avalanches, sismos e tsunamis (Restas, 2015). Na Fig. 2.6, estão ilustradas algumas situações de drones em missões de vigilância proteção ambiental.

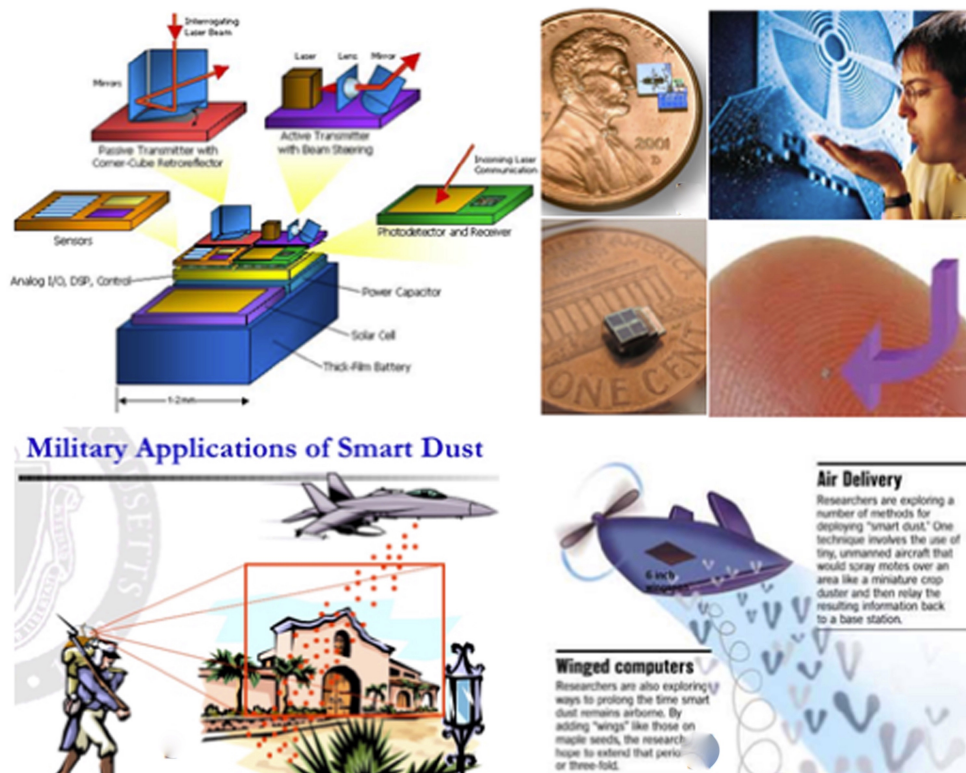


Figura 2.4: O conceito de *smart dust* (Hassanalain e Abdelkefi, 2017a).

2.2.2 Distribuição e logística

Recentemente, o serviço de entrega de encomendas e correio com drones tornou-se um aplicação interessante para diferentes empresas em todo o mundo (Chalupníčková et al., 2014). Por exemplo, a Amazon e o Google, nos EUA, e a DHL na Alemanha (Heutger e Kückelhaus, 2014), usam drones para entregas a clientes. Os veículos para estas missões têm a capacidade de decolar e aterrar na vertical, de modo a operarem em ambientes urbanos. Na Fig. 2.7 apresentam-se missões de entrega de encomendas com drones.

2.2.3 Exploração espacial

Um dos ambientes em que os drones têm grande potencial é o espaço. Diferentes tipos de drones foram projetados e fabricados para realizar missões espaciais e explorações planetárias (Smith e Cutts, 1999; Pergola e Cipolla, 2016). Na Fig. 2.8, apresentam-se alguns exemplos de drones espaciais. Nestes, quer o design, quer a construção obedecem a requisitos próprios, para funcionamento adequado. Por exemplo, devido às diferenças de gravidade em Marte, por comparação com a Terra, os pesos dos drones diferem substancialmente.



Figura 2.5: Exemplos de bio-drones ([Hassanalian e Abdelkefi, 2017a](#)).



Figura 2.6: Drones em operações de vigilância e proteção ambiental (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).



Figura 2.7: Missões de entrega de encomendas com drones (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).

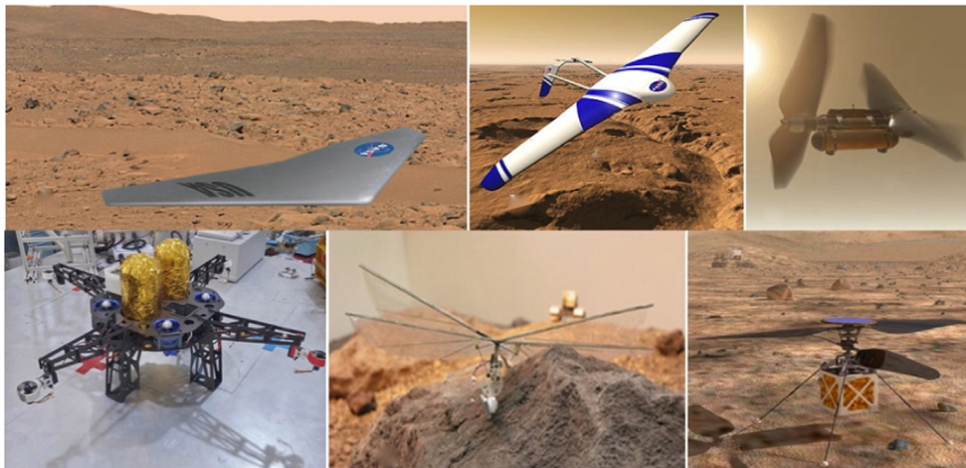


Figura 2.8: Aplicações de drones em exploração espacial (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).

2.2.4 Exploração marítima

Na exploração marítima os drones são usados para estudar a fauna, identificar e localizar embarcações, e identificar focos de poluição, por exemplo. Devido à ausência de pista, a maioria dos drones são lançados verticalmente. Hoje em dia, existem diferentes tipos de drones para missões marítimas, incluindo o Scan Eagle (Reineman et al., 2013), o Volans (Allen e Walsh, 2008), e o Cormorant (Erbil et al., 2009), que são lançados a partir de submarinos. Na Fig. 2.9, são mostrados diferentes tipos de drones para exploração marítima.



Figura 2.9: Aplicações de drones em exploração marítima (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).

2.2.5 Agricultura

Na agricultura há aplicações de drones na inspeção dos sistemas de rega, monitorização de movimentação de gado, controlo de pastagens, e verificação do estado de maturação das espécies, entre outros (Veroustraete, 2015). Na Fig. 2.10, ilustra-se a atuação de drones na agricultura.



Figura 2.10: Aplicações de drones em agricultura (<http://agri.ckcest.cn/ass/NK006-20160418005.pdf>).

2.2.6 Construção civil

A inspeção aérea em tempo real permite rapidamente observar ambientes e detetar falhas. O risco de acidentes na construção civil diminui consideravelmente em obras monitorizadas por drones (Daftry et al., 2015). Na Fig. 2.11, mostram-se drones em missões associadas à construção civil.

2.2.7 Busca e salvamento

Uma aplicação com importância crescente é a busca e salvamento (Shrestha et al., 2014), onde o fator tempo é vital. Enquanto que os aviões e os helicópteros tripulados precisam de tempo para estarem prontos para uma missão, os drones podem ser colocados em ação quase imediatamente, sem grande perda de tempo. Devido ao importante papel dos drones em missões de busca e salvamento, esta área tem crescido nos últimos anos, mas novos desenvolvimentos são



Figura 2.11: Aplicações de drones na construção civil (Daftry et al., 2015).

ainda necessários. Na Fig. 2.12 são mostrados diferentes drones de busca e salvamento (Daftry et al., 2015).

2.2.8 Outras aplicações

Muitas outras aplicações de drone podem ser referidas, umas mais convencionais do que outras. Por exemplo, o Departamento de Polícia Metropolitana de Tóquio revelou a utilização de drones anti-drone. Isto é veículos usados para derrubar drones ofensivos. Outra aplicação consiste na utilização de um drone para guiar (ou assustar) aves para longe das pistas do aeroportos. Outras missões com drones são a tarefas de limpeza de edifícios e de painéis solares, por exemplo (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a). Na Fig. 2.13, mostram-se drones em missões menos convencionais.

É de referir que, na esmagadora maioria das aplicações, os drones estão equipados com câmaras fotográficas e/ou de vídeo, e um conjunto de sensores e transdutores, que permitem adquirir, tratar, arquivar e enviar dados recolhidos remotamente para estações terrestres. Pelo facto de terem autonomia razoável, de algumas dezenas de minutos, baixo peso e controlo de voo preciso, podem facilmente chegar a pontos que, de outra forma, seriam dificilmente alcançados, bem como cobrir áreas geográficas significativas num só voo.



Figura 2.12: Drones para missões de busca e salvamento (Daftry et al., 2015).



Figura 2.13: Aplicações de drones menos convencionais (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).

2.3 Áreas de desenvolvimento

Apesar do crescimento exponencial dos últimos anos, o desenvolvimento de drones continua, com avanços significativos em muitas áreas, mas também com obstáculos que os investigadores

tentam ultrapassar.

De seguida apresentam-se alguns tópicos em desenvolvimento, agrupados em três grandes áreas tecnológicas.

2.3.1 Materiais e processos de fabrico

Nos últimos anos tem havido grandes desenvolvimentos na área dos materiais compósitos, nos métodos de projeto e nas técnicas de fabrico. Estes avanços têm permitido o aparecimento de drones mais leves, mais pequenos e com estruturas mais complexas, que são características importantes, nomeadamente, dos micro-drones (Bürkle et al., 2011). Por outro lado, têm sido possíveis avanços ao nível da aerodinâmica, resistência estrutural e comportamento mecânico (Schmidt et al., 2016). Técnicas de alometria têm permitido otimizar as proporções geométricas dos diferentes componentes, com benefícios na manobrabilidade e consumos de energia (Lee et al., 2016). Outra linha de ação consiste no desenvolvimento de estruturas adaptativas, em função das condições de operação (Floreano et al., 2017; Henderson e Kuester, 2018).

2.3.2 Fonte de energia e atuação

Tipicamente, os drones usam motores de combustão interna ou elétricos. Os segundos são mais apreciados, principalmente em veículos de pequena dimensão. A fonte de energia elétrica é, normalmente, um conjunto de baterias, que tem uma autonomia limitada. O melhoramento da autonomia de voo é um tópico que tem merecido a atenção dos investigadores, seja pelo desenvolvimento de baterias mais eficientes, ou pela utilização de fontes alternativas de energia elétrica, ou ainda pela redução dos consumos de energia. Nesta linha, um exemplo, é o aproveitamento da energia solar (Valavanis, 2008), como mostrado na Fig. 2.14.

Algumas ideias mais inovadoras passam pela transmissão de energia sem fios, em que, por exemplo, o drone poderia ser reabastecido em voo, a partir de uma base (e.g., carro ou navio) (Mohammed et al., 2010).

2.3.3 Controlo

O guiamento, navegação e controlo tem sido um assunto muito estudado nos últimos anos. Existem diferentes técnicas, que conferem diferentes tipos de autonomia, e que são muito dependentes do tipo de sensores instalados nos veículos (Kendoul, 2012; Chao et al., 2010).

Tradicionalmente, o guiamento, navegação e controlo é efetuado através de radio-controlo, vídeo e piloto automático (Hassanalian et al., 2012). No modo radio-controlo, o piloto envia comandos ao drone, que se limita a obedecer às ordens que lhe são transmitidas. Os sistemas de vídeo assentam em técnicas de visão artificial, em que a imagem obtida remotamente é processada e, resultado desse processamento, comandos são gerados para o drone. O piloto automático baseia-se num conjunto de software e hardware que permite que o drone execute a sua missão de voo autonomamente. Por exemplo, ao definir planos de voo, a direção e a velocidade podem ser



Figura 2.14: Drones movidos a energia solar (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).

especificadas em diferentes partes do voo e o drone automaticamente obedece a este plano de voo e tenta executar sua missão com um mínimo de erro (Hassanalian et al., 2012).

Técnicas mais recentes e inovadoras usam sinais de eletroencefalograma (EEG), recolhidos de um operador, para gerar comandos para o drone. Assim, o veículo é guiado através do pensamento (LaFleur et al., 2013).

Em muitas missões há vantagem na utilização de múltiplos drones a trabalhar em cooperação (Fig. 2.15). Isto implica que, além do controlo individual, é necessário algum mecanismo que permita, por exemplo, decidir que tarefa deve ser executada por cada elemento, bem como o que fazer se um ou mais elementos ficarem fora de serviço. Este tópico é um dos mais exigentes, pois requer domínio de muitas sub-áreas, como comunicações, software e inteligência artificial. A gestão da frota pode ir desde um controlo hierárquico centralizado, em que os elementos têm pouca autonomia, limitando-se a obedecer, até um controlo distribuído, em que os elementos possuem inteligência para decidir em tempo-real. No limite, usando técnicas de inteligência artificial, o coletivo terá a capacidade de aprender, sendo que um comportamento coletivo e complexo poderá emergir, a partir de regras individuais simples, sem qualquer supervisão (Bonabeau e Meyer, 2001; Reynolds, 1987; Machado e Lopes, 2015).

2.4 Soluções existentes no mercado

Várias empresas têm vindo a mostrar interesse no desenvolvimento de drones para as mais diversas aplicações, desde o mais simples lazer e diversão, aos sistemas mais complexos como sejam:



Figura 2.15: Frota de drones a trabalhar em cooperação (Hassanalian e Abdelkefi, 2017a).

- vídeo e fotografia pessoal ou entusiasta;
- vídeo e fotografia profissional e cinema;
- mapeamento 3D de terreno e arquitetura;
- caracterização de culturas agrícolas;
- logística, entrega de bens;
- segurança e vigilância;
- busca e salvamento.

De seguida menciona-se um conjunto restrito de empresas de drones, situadas no mercado de consumo, com referência a alguns dos seus produtos.

2.4.1 Jiang Innovations Science and Technology (DJI)

Mundialmente conhecida e uma referência no mercado dos drones, a DJI (<https://www.dji.com/>) representa cerca de 70% de todos os equipamentos vendidos mundialmente, sendo o seu maior sucesso o modelo Phantom 4 (Fig. 2.16). Criada em 2006, teve um crescimento nos últimos 3 anos da ordem dos 300% a 500% (Duening, 2015), o que demonstra bem a expansão rápida e exponencial da utilização destes equipamentos na sociedade.



Figura 2.16: Drone Phantom 4 Pro da DJI (<https://www.dji.com/>).

2.4.2 Yuneec

A Yuneec (<http://us.yuneec.com/>) está sediada em Kunshan, Jiangsu, China. É uma empresa importante que produz mais de 1 milhão de unidades por ano. Em 2014, a Yuneec apresentou mundialmente o quadricóptero Typhoon Q500, descrito como o primeiro drone pronto para voar e pronto a usar.

Em 2015, a Yuneec melhorou o Typhoon adicionando-lhe uma câmara 4K e introduzindo um SteadyGrip, o que transformou o Typhoon numa “solução de imagem aérea e terrestre”. Recursos inovadores como *Watch Me*, *Follow Me* e *Dynamic Return Home*.

Os modelos atuais mais importantes incluem o Typhoon H 4k e o Yuneec Breeze, um compacto drone inteligente (Fig. 2.17).

2.4.3 Parrot

A Parrot (<https://www.parrot.com/pt/en/>) é uma empresa francesa sediada em Paris. A sua entrada no mercado dos drones é relativamente recente, mas com considerável sucesso.

Os novos modelos incluem o Bebop 2 Drone, um quadricóptero avançado, com muitos recursos, e o Parrot Disco FPV, um drone de asa fixa que tem autonomia de bateria de 45 minutos (Fig. 2.18).



Figura 2.17: O Typhoon H 4k e o Yuneec Breeze (<http://us.yuneec.com/>).

2.4.4 Autel Robotics

A Autel Robotics (<https://www.autelrobotics.com/>) tem sede nos EUA, em Bothell WA, e é uma subsidiária da Autel Intelligent Technology Company Ltd., fundada em 2004 e sediada em Shenzhen, China.

A Autel Robotics foi fundada em 2014, sendo o seu principal objetivo desenvolver drones aéreos fáceis de usar em fotografia aérea. Atualmente, oferece o X-Star Premium Drone, com uma câmara 4K, um drone que compete diretamente com o popular Phantom 4 da DJI (Fig. 2.19).

Outras empresas importantes são a 3DR (<https://3dr.com/>), a EHang (<http://www.ehang.com/>), a Walkera (<http://www.walkera.com/>), a Syma (<http://www.symatoys.com/>), a Blade (<http://www.bladehelis.com/Aircraft/>), a Hubsan (<http://ww>



Figura 2.18: O Bebop 2 Drone e o Parrot Disco FPV (<https://www.parrot.com/pt/en/>).

[w.hubsan.com/na/](http://www.hubsan.com/na/)) e a UDI RC (<http://www.udirc.com/>).



Figura 2.19: O X-Star Premium Drone da Autel (<https://www.autelrobotics.com/>).

Capítulo 3

Solução de hardware

Neste capítulo descrevem-se as tarefas de especificação, seleção e integração de componentes de hardware, culminando na montagem e implementação do protótipo de veículo.

3.1 Especificações da plataforma de voo

Como referido anteriormente, na definição dos objetivos do trabalho (1.2), pretende construir-se uma aeronave não tripulada capaz de realizar voo com intervenção remota do utilizador, ou missões completamente autónomas previamente programadas. Para o efeito, foram definidos certos requisitos funcionais e especificações para o sistema, conforme listado de seguida.

Requisitos funcionais:

- capacidade de pairar;
- capacidade de pré-programação de uma missão;
- possibilidade de execução de voo autónomo;
- aceitação de instruções a partir de terra durante o voo;
- capacidade de transmissão, bidirecional, de dados de telemetria.

Especificações:

- possibilidade de voar durante um período de tempo mínimo de 20 minutos;
- capacidade de carga mínima de 4 kg.

Tendo em conta os atributos exigidos, a primeira decisão a tomar prende-se com a seleção do tipo de modelo de drone que deve ser adotado, nomeadamente de asa fixa ou de asa rotativa. Na Tabela 3.1 apresentam-se de forma qualitativa as principais diferenças entre os dois tipos de avião.

Um veículo de asa fixa, na sua configuração habitual, tem como limitações principais não poder pairar e apresentar uma capacidade de carga relativamente baixa. Deste modo, colocou-se de parte esta solução, apesar de ser interessante do ponto de vista da distância percorrida, bem

Tabela 3.1: Comparação entre modelos de avião de asa fixa e de asa rotativa.

Especificação	Asa fixa	Asa rotativa
Distância de voo	grande	pequena
Velocidade	elevada	baixa
Capacidade de carga	baixa	elevada
Manobrabilidade	baixa	elevada
Capacidade de pairar	não	sim
Área descolagem	grande	pequena
Tamanho	grande	pequeno

como da velocidade que pode alcançar em voo. Assim, a escolha recaiu sobre um sistema de asa rotativa.

Dentro dos modelos de asa rotativa, há agora a necessidade de escolher o número de rotores principais, nomeadamente decidir entre *single rotor* ou *multirotor*. Um avião de asa rotativa dispondo de apenas um rotor para controlar a atitude e o rolamento é vulgarmente chamado de helicóptero. Embora existam várias configurações, um helicóptero tradicional é constituído por um rotor principal, responsável pela sustentação, rolamento e atitude, e um rotor de cauda, responsável pela deriva do veículo (Fig. 3.1).



Figura 3.1: Helicóptero modelo Blade 120 (<https://www.bladehelis.com/>).

Tipicamente, cada rotor possui pás de passo variável, o que permite variações na atitude (*pitch*), no rolamento (*roll*) e na deriva (*yaw*) (Fig. 3.2), com uma velocidade de rotação das pás constante e variação cíclica do passo da hélice a cada rotação.

Nos modelos radio controlados, a configuração de asa rotativa obriga à utilização de servomotores rápidos e precisos, de modo a possibilitarem pequenas variações no passo das pás dos rotores, condições necessárias para poder controlar-se o veículo. Para além disso, dada a complexidade e o número de componentes envolvidos, os modelos de asa rotativa têm, tipicamente, um custo elevado, claramente acima dos modelos de asa fixa.

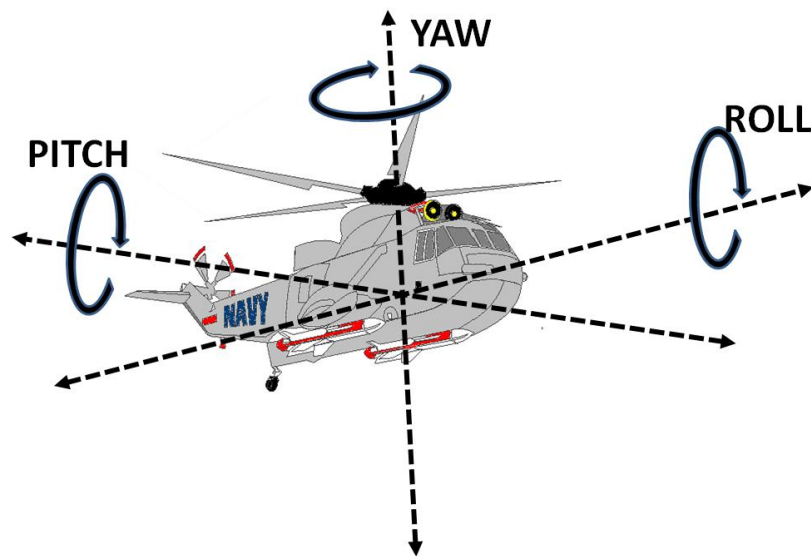


Figura 3.2: Atitude (*pitch*), rolamento (*roll*) e deriva (*yaw*) (<https://bayesianadventures.wordpress.com/>).

Nos últimos anos, com o desenvolvimento das unidades de medição inerciais, IMU, têm surgido modelos de asa rotativa multi rotores, com as vantagens de serem consideravelmente mais simples do ponto de vista da construção mecânica. A atitude, o rolamento e a deriva são controlados variando a velocidade de cada um dos motores individualmente, acionando hélices de passo fixo. Assim, dispensam a utilização de servomotores e transmissões mecânicas complexas.

A principal desvantagem dos multi rotores é a sua baixa eficiência quando comparados com os helicópteros tradicionais. Na Tabela 3.2 enumeram-se de forma qualitativa as principais diferenças entre os dois tipos de modelos.

Tabela 3.2: Principais diferenças entre os helicópteros e os modelos multi rotores.

Característica	Helicóptero	Multi rotor
Eficiência	alta	baixa
Estabilidade	boa	fraca
Construção	complexa	simples
Capacidade de carga	baixa	elevada
Redundância	não	sim, dependendo da configuração

Pelas características, a simplicidade e o custo apresentados, optou-se então pela construção de um modelo de asa rotativa multi rotor. Estes veículos podem apresentar diferentes tipos de configuração, dependendo do número de motores e da disposição na plataforma (Fig. 3.3).

Cada configuração apresenta vantagens e desvantagens, nomeadamente relacionadas com a

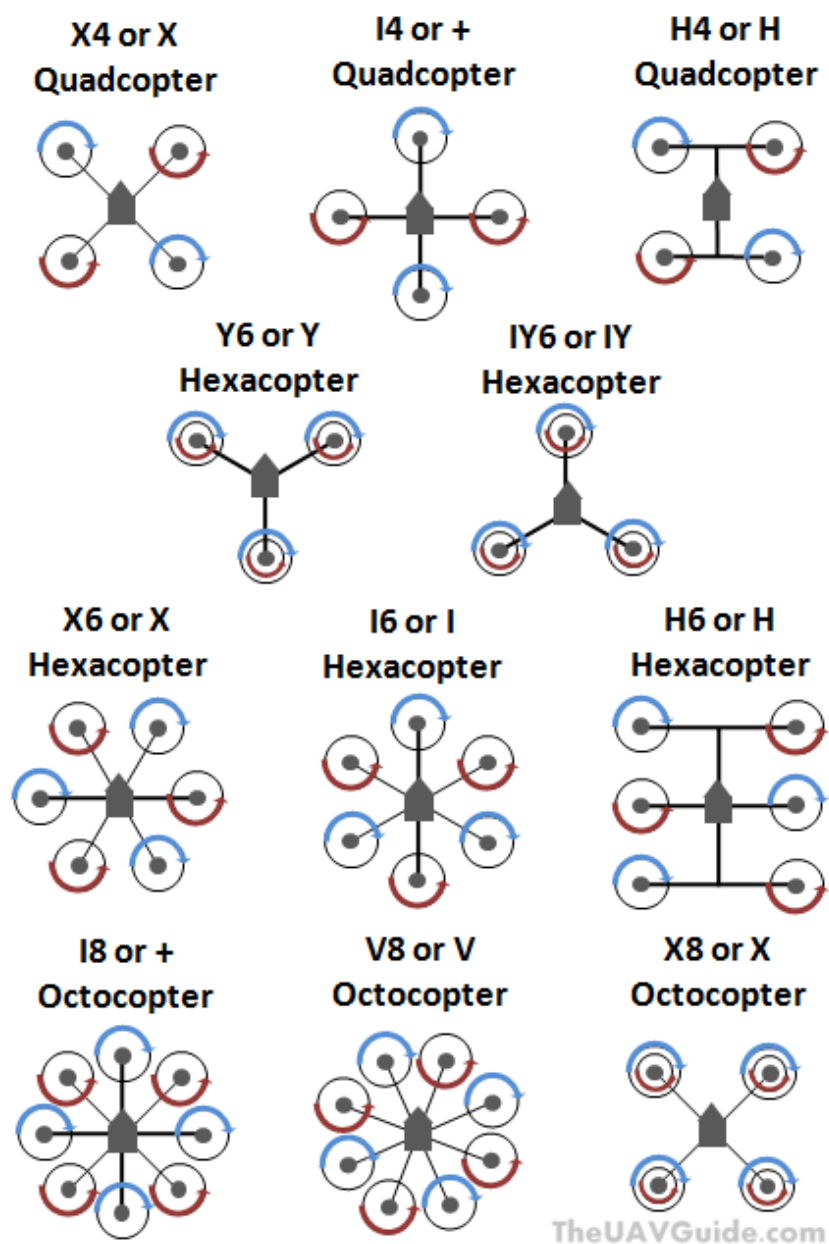


Figura 3.3: Diferentes tipos de configuração para multi rotores (<https://theuavguide.com/>).

capacidade de carga e a possibilidade de voarem mesmo com a perda de rotores. Na Tabela 3.3 resumem-se as principais características de diferentes configurações de veículos multi rotores.

Da Tabela 3.3 pode concluir-se que a configuração mais balanceada é a de seis rotores, designada habitualmente por hexacóptero, pelo compromisso entre custo e complexidade moderada, bem como a possibilidade de permitir voar mesmo com falha de um motor. Sendo a solução mais equilibrada, foi esta a opção escolhida.

Tabela 3.3: Comparação entre diferentes configurações de multi rotores.

Número de rotores	Três	Quatro	Seis	Oito
Capacidade de carga	+	++	+++	++++
Complexidade	+++	+	++	++++
Custo	+	++	+++	++++
Redundância	–	–	+	+++

Após uma pesquisa de mercado, verifica-se a existência de uma ampla oferta de *kits* de hexacópteros, pelo que se torna mais interessante a compra de uma plataforma, em detrimento de uma construção de raiz. Assim, optou-se pela aquisição de um hexacóptero em fibra de carbono, modelo Tarot 680 Pro (Fig. 3.4).



Figura 3.4: Plataforma modelo Tarot 680 Pro.

Como principais características deste modelo destacam-se:

- boa área disponível para montagem de equipamento;
- construção robusta em fibra de carbono;
- braços em tubo de 16 mm com espaço para passagem de cabos;
- placa de circuito impresso, PCB, com condutores impressos, de modo a facilitar a cablagem;
- braços retráteis para simplificação do transporte e armazenamento;
- distância entre eixos dos motores com 680 mm.

Como referido, um aspeto interessante deste *kit* é a integração dos condutores na placa de PCB (Fig. 3.5). Desta forma é possível ligar por soldadura a alimentação elétrica à placa, sendo a distribuição de corrente feita sem cabos até junto dos tubos que suportam cada motor. Evitam-se assim as placas de distribuição de corrente ou caminhos de cabos complexos, que limitariam o espaço para os restantes componentes (Fig. 3.6).

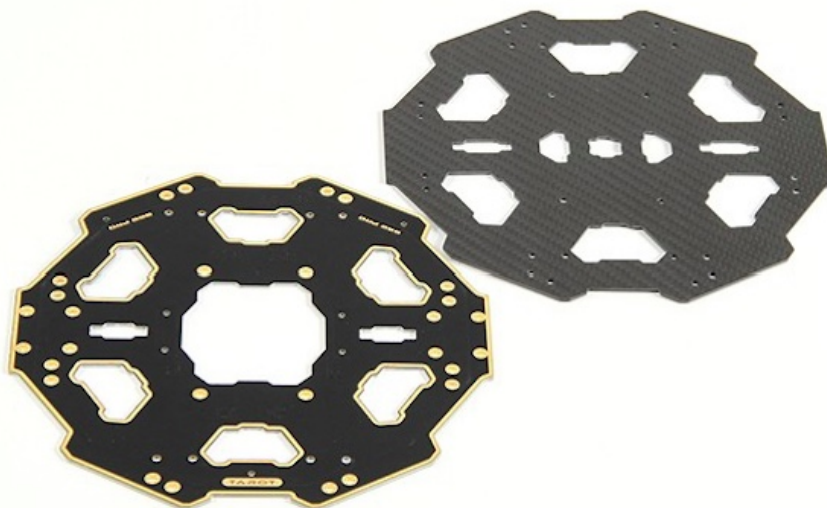


Figura 3.5: Placas centrais do *kit*: fibra de carbono e PCB.

3.2 Acionamento

Após a seleção da plataforma de voo, da configuração e do número de motores, foi necessário dimensionar o acionamento a utilizar. Tipicamente, podem ser utilizados motores elétricos ou de combustão interna. No caso de modelos multi rotores é quase impossível a utilização de motores de combustão interna, essencialmente pela complexidade de armazenamento e de distribuição de combustível, mas também pelo elevado peso dos motores (Fig. 3.7).

Por outro lado, os motores de combustão interna requerem servomecanismos para regular a alimentação de combustível, o que torna extremamente complexo o sincronismo entre os vários motores. Como tal, a solução passa pela utilização de motores elétricos, mais leves e eficientes (Fig. 3.8).

Desde o início do aeromodelismo, a utilização de motores elétricos passou essencialmente por duas fases. Num primeiro período recorreu-se a motores DC com escovas. Mais recentemente, os motores DC sem escovas (*brushless*) foram ganhando mais espaço.

Com a estrutura, o número de rotores e o tipo de acionamento definidos, foi necessário dimensionar os restantes componentes de hardware do sistema. Este foi um processo iterativo, uma vez que a escolha de um determinado elemento condiciona os restantes. O procedimento envolveu:



Figura 3.7: Exemplo de motor de combustão interna.



Figura 3.8: Comparação de motores de combustão interna vs elétrico.

A hélice roda em torno de um eixo concêntrico com o eixo do motor, o que significa que a velocidade tangencial aumenta com o raio (comprimento da hélice). Assim, de forma a garantir que o impulso gerado é constante em todo o comprimento da hélice, este é “torcido” variando o passo ao longo do seu comprimento (Fig. 3.11).

Existem duas formas de variar a força de impulso gerada pela hélice. Assim:

- **passo fixo** – a variação do impulso é conseguida com a variação da velocidade de rotação;
- **passo variável** – existe um mecanismo que permite variar o ângulo da hélice, permitindo que o motor trabalhe a velocidade constante num ponto de funcionamento perto do ponto de melhor rendimento.

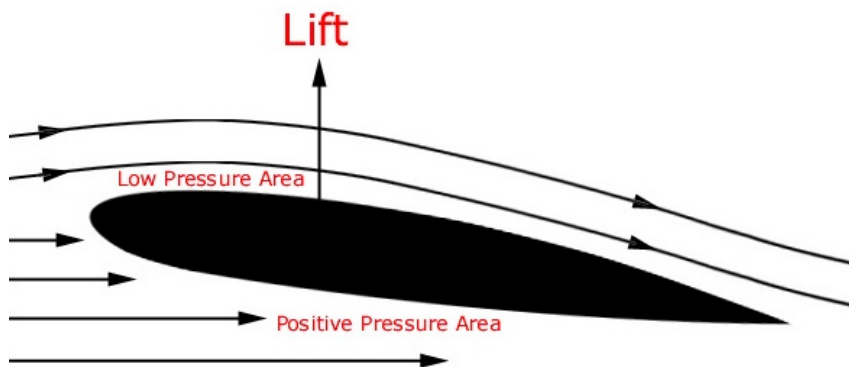


Figura 3.9: Escoamento num perfil alar.

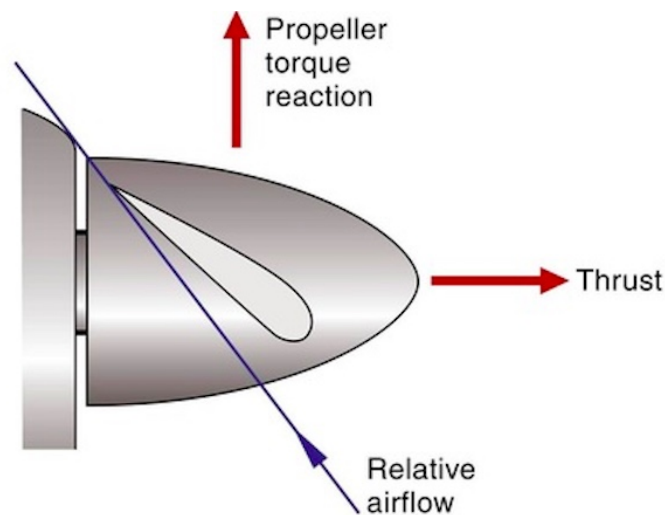


Figura 3.10: Representação esquemática do movimento da hélice.

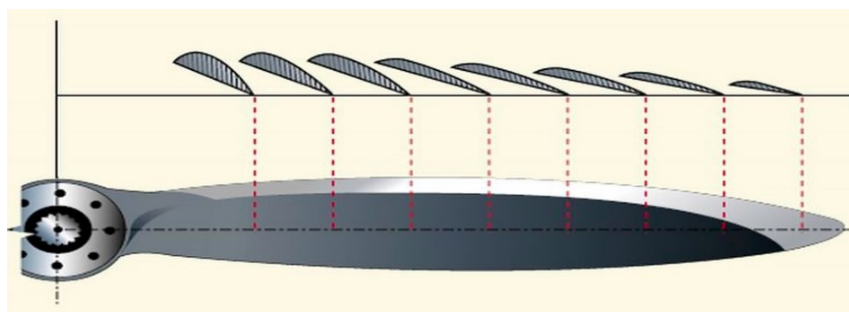


Figura 3.11: Variação do passo ao longo do comprimento da hélice.

Quanto aos materiais da hélice, os mais utilizados são a madeira, o metal (normalmente ligas de alumínio) e os compósitos. Atualmente existe um grande desenvolvimento no que respeita a compósitos, utilizando-se a fibra de carbono por excelência. As hélices de madeira são os mais

leves, assumindo que toda a restante geometria (passo e diâmetro) seja igual. A fibra de carbono tem como principal característica a elevada rigidez, o que garante a manutenção da geometria mesmo quando submetida a esforços elevados.

Tendo em conta a dimensão da plataforma escolhida para o drone e a distância entre eixos dos motores, optou-se por hélices de 13” em fibra de carbono.

3.2.2 Motores DC *brushless*

Como referido no ponto 3.2, existem basicamente dois tipos de motores elétricos utilizados no aeromodelismo. Os motores DC com escovas são os mais simples, porém apresentam algumas desvantagens face aos DC *brushless*, nomeadamente:

- as escovas sofrem desgaste;
- o comutador tem que ser limpo regularmente como consequência do desgaste das escovas;
- o atrito entre escovas e comutador conduz a um rácio potência/peso baixo;
- o atrito existente contribui para uma autonomia baixa e um maior consumo de energia.

Recentemente tem vindo a generalizar-se a utilização de motores DC sem escovas. A principal diferença em relação aos motores com escovas é que os pólos são estacionários e os ímanes permanentes estão colocados no rotor (Fig. 3.12). As vantagens dos motores DC *brushless* resultam de:

- não existirem escovas nem comutadores;
- não necessitarem de manutenção, não sendo preciso proceder à limpeza de componentes;
- terem um rácio de potência/peso elevado;
- não terem atrito, levando a uma maior eficiência e a um menor consumo de energia.

3.2.3 Controladores de velocidade

Nos motores sem escovas, a comutação é assegurada por um sistema eletrónico, ESC. O ESC usa três linhas, duas para alimentação e uma para *feedback* da velocidade de rotação do motor. De modo a manter uma determinada velocidade de rotação, o ESC determina a corrente necessária para cada fase do motor (Fig. 3.13). Tal é feito através de sinais *pulse width modulation*, PWM, que ativam ou desativam conjuntos de transístores MOSFET, que por sua vez energizam as bobinas (com alimentação pela bateria) a frequências típicas entre 2 e 5 kHz (Fig. 3.14). Desta forma consegue controlar-se a potência transmitida ao motor, à qual corresponderá uma determinada velocidade de rotação.

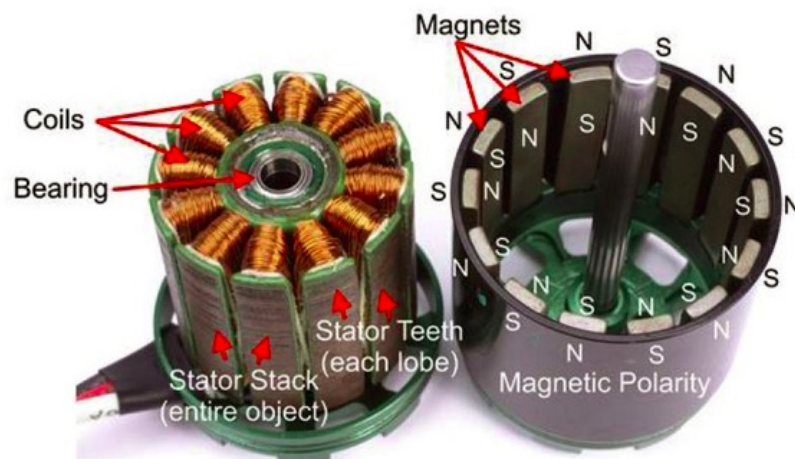


Figura 3.12: Motor elétrico DC sem escovas.

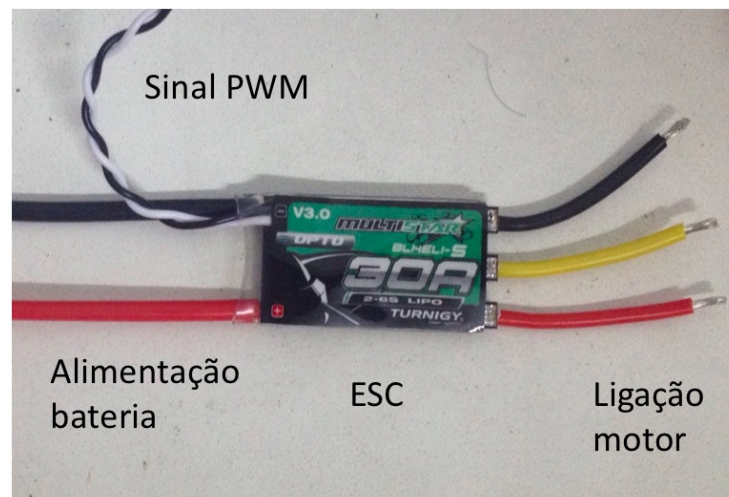


Figura 3.13: ESC para motor DC sem escovas.

3.2.4 Baterias

Utilizar modelos com acionamento elétrico implica a escolha adequada das baterias, pois constituem a única fonte de energia usada para alimentar todos os elementos que constituem o sistema, quer de comando, quer de potência. Inicialmente, as baterias usadas em aeromodelismo eram sobretudo do tipo níquel cádmio, NiCd, tendo sido gradualmente substituídas pelas de polímero de lítio, LiPo.

As baterias LiPo apresentam algumas vantagens e desvantagens face às NiCd, como listado de seguida.

Vantagens:

- estão disponíveis em grande variedade de tamanhos e formas construtivas;

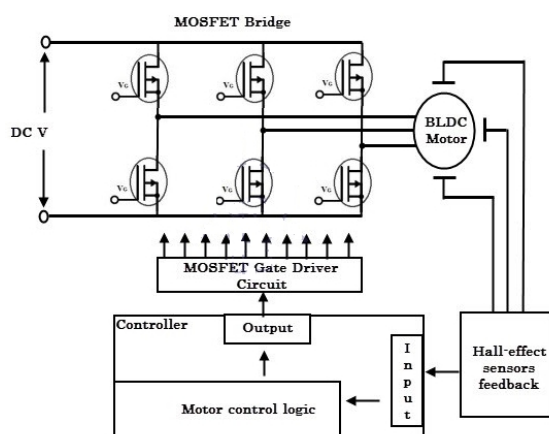


Figura 3.14: Diagrama simplificado de um ESC.

- apresentam elevada capacidade de corrente de descarga;
- possuem grande capacidade de armazenamento face ao peso;

Desvantagens:

- suportam um menor número de ciclos carga/descarga;
- são mais sensíveis a danos mecânicos, com riscos de incêndio;
- necessitam de carregadores específicos para assegurar capacidade de carga e armazenamento;
- apresentam um custo mais elevado.

Na Fig. 3.15 apresentam-se, a título de exemplo, baterias LiPo de diferentes tamanhos e capacidades.

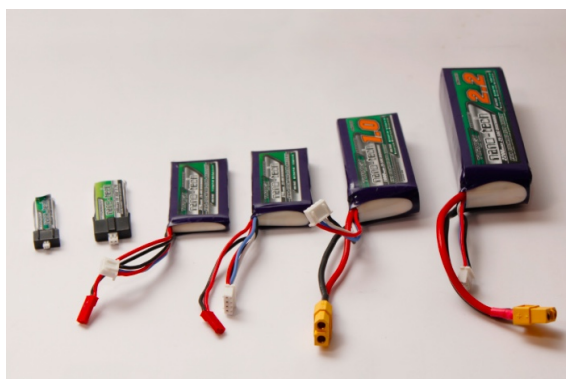


Figura 3.15: Exemplos de baterias LiPo.

Pelas vantagens acima indicadas, sobretudo no que respeita ao bom rácio capacidade/peso e à elevada capacidade de descarga, as baterias LiPo são atualmente o standard nos aeromodelos.

Para medir o consumo de corrente, bem como monitorizar a tensão da bateria e, com isso, monitorizar a carga em cada momento, utilizou-se um *power module* (Fig. 3.16), que integra:

- voltímetro – para medição da tensão de alimentação da bateria;
- amperímetro – para medição da corrente total consumida pelo sistema;
- fonte de alimentação DC de 5 V – para alimentação do controlador de voo.

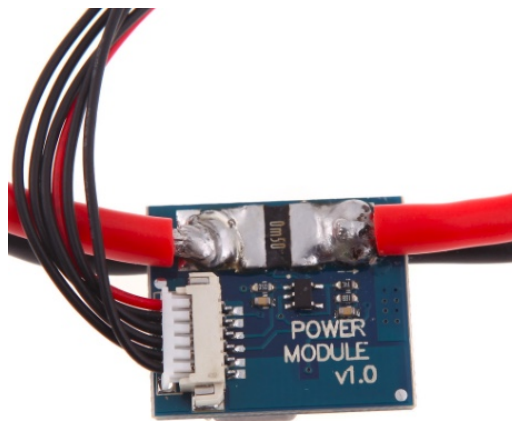


Figura 3.16: *Power module*.

3.2.5 Cálculo do acionamento

A característica essencial exibida por qualquer modelo é a sua capacidade de poder voar, pelo que é essencial determinar qual o impulso necessário para vencer a força da gravidade, sendo que este depende da geometria da hélice e da sua velocidade de rotação. No aeromodelismo em geral, considera-se que, para obter um bom comportamento dinâmico, o impulso deve ser o triplo da massa. Assim, partindo de uma estimativa da massa total do veículo, é necessário:

1. seleccionar as hélices e os motores;
2. determinar o consumo de corrente e seleccionar os ESCs adequados;
3. escolher a bateria com a capacidade necessária para garantir a autonomia definida;
4. determinar o impulso;
5. determinar a massa;
6. determinar o rácio impulso/peso;
7. se o rácio for inferior a 3, voltar ao passo 1;

Tabela 3.4: Especificações iniciais.

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa	3,4	kg
Tempo voo	20	minutos
Número de motores	6	–
Rácio impulso/peso	3	–

Na Tabela 3.4 apresentam-se as especificações iniciais que foram consideradas no processo de seleção de componentes relacionados com o acionamento.

O cálculo exato do impulso gerado por uma hélice é bastante complexo, pelo que aqui se apresenta um cálculo simplificado. Como ilustrado na Fig. 3.17, quando a hélice roda, devido à velocidade e ao passo, gera-se uma alteração da pressão no círculo da hélice, ΔP .

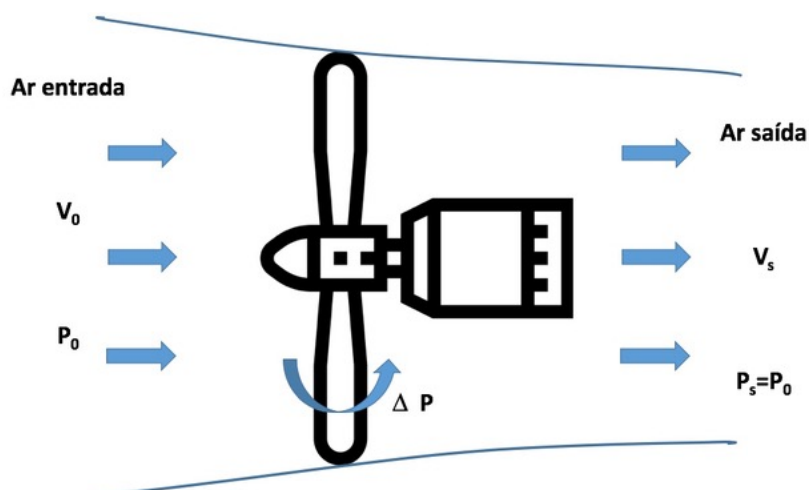


Figura 3.17: Representação do impulso gerado na hélice.

A força de impulso gerada, F , é proporcional à variação de pressão, ΔP , e à área, A , do círculo da hélice, admitindo a hélice em forma de disco:

$$F = \Delta P \cdot A \quad (3.1)$$

Aplicando a equação de Bernoulli pode relacionar-se a velocidade e a pressão a montante da hélice, sendo a pressão total, P_{t0} , igual à pressão estática, P_0 , mais a pressão dinâmica, P_{d0} , equação (3.2), em que ρ é a densidade do ar e V_0 a velocidade do veículo em relação ao ar:

$$P_{t0} = P_0 + P_{d0} \quad (3.2a)$$

$$P_{d0} = 0,5 \cdot \rho \cdot V_0^2 \quad (3.2b)$$

Por outro lado, a jusante da hélice tem-se uma relação entre a pressão total, P_{ts} , e a velocidade de saída V_s dada por:

$$P_{ts} = P_0 + 0,5 \cdot \rho \cdot V_s^2 \quad (3.3)$$

Assim, na hélice vem:

$$\Delta P = P_{ts} - P_{t0} \quad (3.4)$$

Substituindo as variáveis em (3.4), obtém-se:

$$\Delta P = 0,5 \cdot \rho \cdot (V_s^2 - V_0^2) \quad (3.5)$$

Considerando a velocidade relativa do modelo face ao ar, $V_0 = 0$, e relacionando a velocidade a jusante da hélice com o seu passo e velocidade de rotação, $V_s = rpm_{hélice} \cdot p$, pode calcular-se o impulso combinando as equações (3.5) e (3.1):

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot (rpm_{hélice} \cdot p)^2 \quad (3.6)$$

Note-se que esta é uma aproximação bastante simplificada que não tem em conta:

- o escoamento não tem velocidade constante ao longo da hélice, uma vez que o ângulo é variável;
- eficiência da hélice em função do número de pás e da geometria da hélice.

De forma empírica, Gabriel Staples (<https://www.electricrcaircraftguy.com/2014/04/propeller-static-dynamic-thrust-equation-background.html>) adicionou um fator de correção de modo a que os resultados fossem mais aproximados com os medidos experimentalmente, chegando à equação (3.7):

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot (rpm_{hélice} \cdot p)^2 \cdot \left(\frac{d}{p}\right)^{1,5} \quad (3.7)$$

No ponto 3.2.1, foram selecionadas hélices de 13". Assumindo massa total estimada de 3,4 kg é necessário garantir uma força de impulso superior de modo a conseguir obter movimento ascendente, ou seja, velocidade vertical maior que zero. Empiricamente e de forma generalizada, para obter uma boa performance de voo, recomenda-se um acionamento com uma força de impulso três vezes superior à massa do modelo. Deste modo, pode resolver-se a equação 3.7 para determinar qual a velocidade de rotação necessária em função do passo, considerando a força de impulso total aproximadamente 10 kgf. Após algumas iterações, selecionaram-se hélices com passo 5,5" com velocidade de rotação 6900 rpm.

Na Tabela 3.5 apresenta-se um resumo do cálculo do impulso:

Tabela 3.5: Resumo do cálculo do impulso.

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa	3,4	kg
Rácio impulso/peso	3	–
Impulso necessário	10	kgf
Impulso por hélice 13 × 5,5”	1,676	kgf
Impulso total	10,05	kgf
Velocidade vertical	5	m/s
Impulso total com velocidade vertical	6,9	kgf

É agora necessário selecionar os motores capazes de trabalharem com velocidade de rotação igual a 6900 rpm e de seguida determinar a potência elétrica e corrente consumida de forma a selecionar a bateria e o controlador de velocidade adequados.

O cálculo da potência necessária para acionar a hélice é bastante complexo, tendo em conta a geometria não linear da hélice, a força de atrito, a densidade do ar, e o rendimento do motor.

Existem no entanto algumas expressões empíricas que, com algumas simplificações, permitem calcular de uma forma prática e expedita a potência elétrica necessária para uma determinada velocidade de rotação e geometria da hélice.

Assim a potência mecânica é resultado do produto entre diâmetro da hélice, d_h , o passo, P , e a sua velocidade de rotação, rpm_h , corrigidas as unidades com dois fatores constantes, (3.8):

$$Pot = \frac{d_h^4 \cdot P \cdot rpm_h^3}{1,4 \cdot 10^{17}} \cdot 745,699 \quad (3.8)$$

Substituindo as variáveis obtém-se:

$$Pot = 275 \text{ W} \quad (3.9)$$

Com base neste resultado, selecionaram-se os seguintes componentes, Tabela 3.6:

Tabela 3.6: Resumo dos componentes selecionados.

Componente	Valor
Motor	Multistar 3508 580 KV
ESC	Afro race spec mini 30 A
Bateria	2 x 5400 mAh 14,8

Existe também uma ferramenta de cálculo online (<https://ecalc.ch>) que permite validar os componentes selecionados. Nas Figs. 3.18 - 3.19 apresenta-se o resumo obtido com a ferramenta de cálculo.



Figura 3.18: Resumo obtido com a ferramenta de cálculo (I).

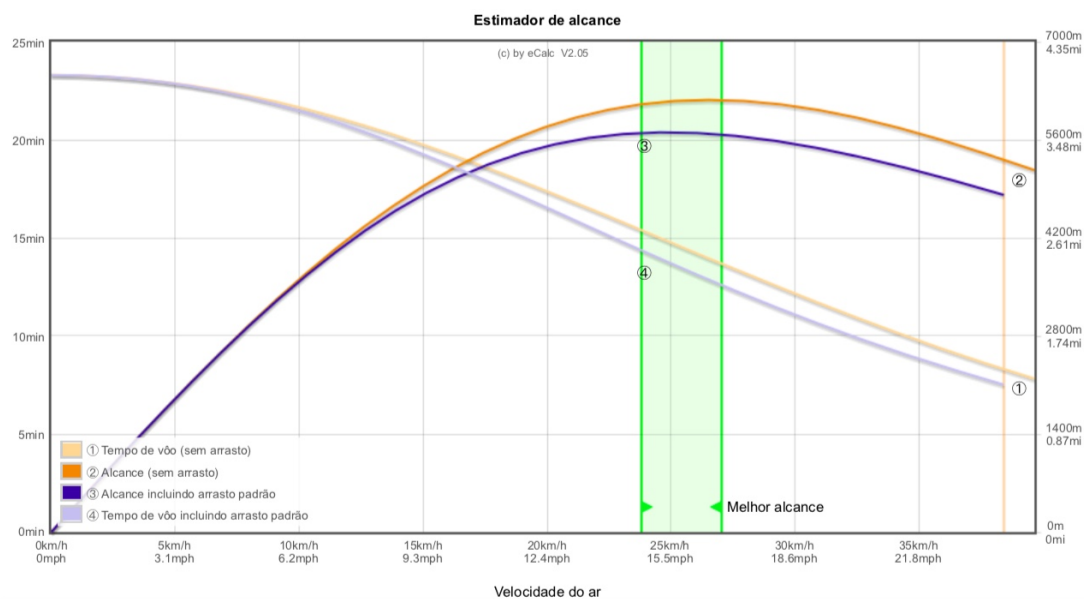


Figura 3.19: Resumo obtido com a ferramenta de cálculo (II).

3.3 Controlador de voo

Após a seleção e dimensionamento do acionamento é necessário escolher o controlador de voo. Este controlador é o “cérebro” que possibilita o funcionamento de todo o sistema. Possui um conjunto de entradas para sinais de sensores, que recolhem informação diversa, que é depois

processada de modo a obter-se o comportamento final desejado.

Existem controladores proprietários, destinados a trabalharem com hardware e software específico (Fig. 3.20). Tipicamente, são fáceis de configurar e vêm pré-programados e configurados para um hardware standard. Por outro lado, sendo de código fechado, não permitem alterações de fundo na configuração e parâmetros, nomeadamente ajustes de PIDs.

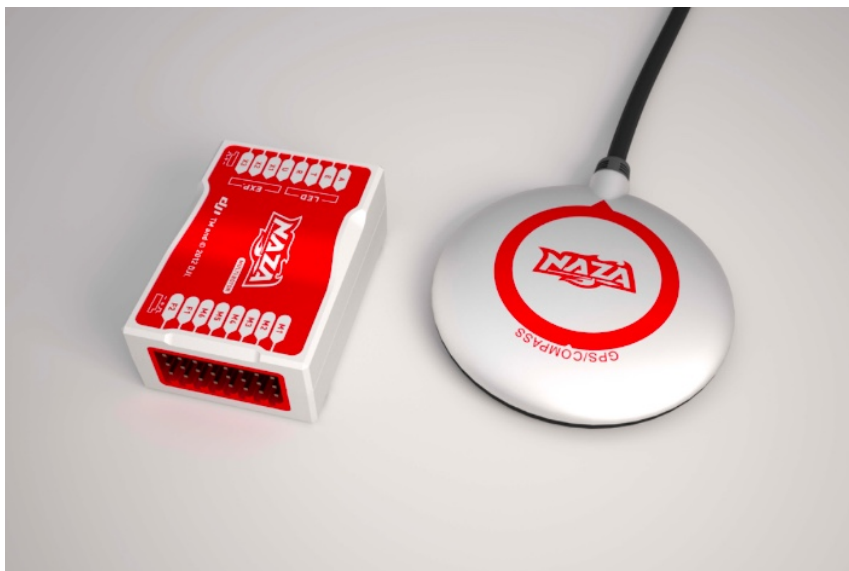


Figura 3.20: Controlador de voo Naza da DJI.

Para a aplicação em causa o que se pretende é um sistema de código aberto, que integre o máximo possível de sensores e, por outro lado, que tenha a possibilidade de expansão futura, permitindo também a ligação de mais componentes para funções diversas.

3.3.1 Seleção do controlador

Um multi rotor é impossível de controlar sem informação da orientação e da velocidade/aceleração do veículo, pelo que o giroscópio e o acelerómetro são obrigatórios para permitirem o voo. Por outro lado, o GPS é essencial para realizar voo autónomo, uma vez que é necessário em cada momento determinar onde se encontra o drone, incluindo informação sobre a altitude. A bússola e o barómetro não são obrigatórios, mas quando utilizados, permitem determinar com maior precisão a altitude e a direção do veículo.

Cada um dos componentes acima enumerados pode ser adquirido em separado, como é o caso, por exemplo, do acelerómetro Sparkfun ADXL345 (Fig. 3.21), para depois serem integrados, utilizando protocolos de comunicação como o I2C.

Apesar deste tipo de solução permitir uma maior liberdade de escolha de cada elemento, o facto de ser necessário integrar todos os componentes torna a solução mais complexa, menos compacta e mais pesada. Como a minimização de espaço e peso são requisitos importantes para todo o sistema, optou-se por seleccionar um controlador com um número elevado de entradas.

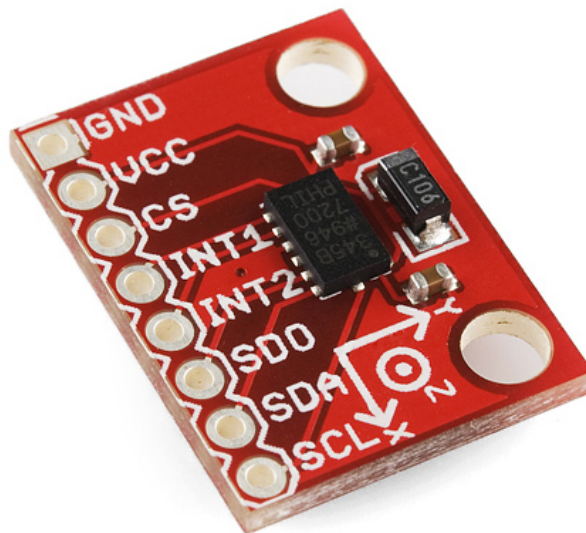


Figura 3.21: Acelerómetro Sparkfun ADXL345.

É assim viável a montagem a bordo de instrumentação para recolha de informação diversa. Os sensores selecionados têm distintas funcionalidades, conforme listado:

- giroscópio – mede a velocidade angular, permite determinar a orientação;
- acelerómetro – mede a aceleração, permite obter informação sobre o movimento;
- barómetro – mede a pressão atmosférica, permite determinar a altitude;
- bússola – mede a direção, permite determinar a orientação face ao norte magnético;
- GPS – mede as coordenadas geográficas, por triangulação de sinais de satélite, permite determinar a posição.

Em termos de processamento de informação, os controladores de voo existentes no mercado apresentam processadores de 8 bit ou 32 bit. Os de 32 bit são muito mais rápidos, pelo que permitem analisar toda a informação da instrumentação e efetuar as correções correspondentes em muito menos tempo. Deste modo, os controladores de 32 bit permitem um voo mais suave e “melhor” do que as versões de 8 bit.

Com base nas especificações e característica pretendidas, selecionou-se o HKPilot 32, baseado no hardware Pixhawk (Fig. 3.22), com as características enumeradas na Tabela 3.7.

3.4 Aquisição e transmissão de vídeo

Pretende-se que o sistema transmita vídeo desde uma câmara embarcada para a estação de terra. Para o efeito utilizou-se para teste uma câmara GoPro equivalente, ligada a um transmissor de vídeo embarcado, com o respetivo recetor ligado à estação de terra.



Figura 3.22: Controlador de voo HKPilot 32.

Tabela 3.7: Características HKPilot 32, baseado no hardware Pixhawk.

Parâmetro	Valor
CPU	STM32F427 32 bit
Memória RAM	256 KB a 168 MHz
Memória flash	2 MB
Acelerómetro/giroscópio	MPU6000
Giroscópio secundário	ST Micro L3GD20 3 eixos
Acelerómetro secundário	ST Micro LSM303D 3 eixos
Barómetro	MEAS MS5611
GPS (não integrado)	Neo-7M Ubox

Instalou-se ainda um sistema *on screen display* que permite sobrepor a informação de telemetria na imagem vídeo transmitida para terra (Fig. 3.23).

Em voo, um drone é sujeito a um conjunto de perturbações externas, nomeadamente vibrações induzidas pelo funcionamento dos seus motores/hélices e também pela ação do vento. Estas perturbações condicionam a aquisição de vídeo em boas condições de estabilidade de imagem, pelo que a utilização de estabilizadores de câmara é fundamental. Atualmente existem estabilizadores de 2 e 3 eixos, para as mais diversas aplicações, adequados para telemóveis, câmaras desportivas, ou câmaras profissionais (Fig. 3.24).

Para as câmaras desportivas GoPro e equivalentes, a utilização de estabilizadores de 2 eixos é mais comum, sobretudo pelo baixo custo e reduzido peso. Para este projeto foi selecionado o estabilizador Tarot T-2D (Fig. 3.25).

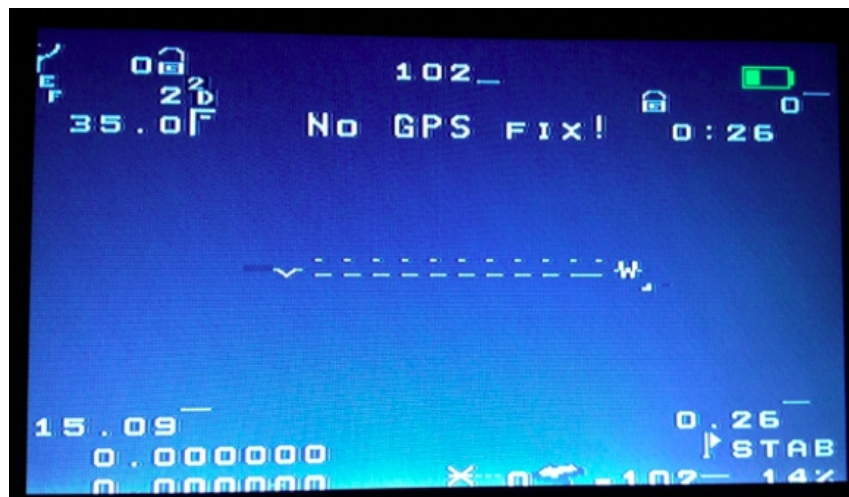


Figura 3.23: Informação de telemetria sobreposta à imagem de vídeo.



Figura 3.24: Exemplo de um estabilizador de imagem profissional.

Para além da estabilização de imagem, o equipamento permite receber indicações do controlador de voo, através de uma saída auxiliar, para apontar a câmara numa determinada direção. Em voo, esta solução possibilita a obtenção de imagens de um determinado local sem ter a necessidade de mover o drone.



Figura 3.25: Estabilizador de imagem Tarot T-2D.

Para alimentação dos componentes relacionados com a aquisição de transmissão de vídeo, i.e., câmara, OSD, e transmissor, optou-se por uma bateria dedicada. Assim, obtém-se uma solução modular, ou seja, por um lado tem-se uma sistema de alimentação responsável pelo controlo de movimento do drone e, por outro, um sistema acessório, neste caso aquisição e transmissão de vídeo. Pelo facto dos dois sistemas estarem separados, é possível que, no futuro, possa ser utilizado um outro sistema que não relacionado com vídeo.

3.5 Comunicações

A comunicação bidirecional entre os diversos módulos do drone e a estação de terra desempenha um papel fundamental no seu comportamento global, uma vez que é necessário garantir que os sinais são transmitidos nas devidas condições, quer por cabo, quer por radiofrequência. Como referido em 3.1, pretende-se que o drone seja capaz de realizar um voo autónomo pré-programado e aceitar ordens enviadas a partir de terra por um operador, quer utilizando um emissor rádio, quer utilizando o software da estação de terra. Em qualquer dos casos, o sistema deve ser capaz de transmitir informação recolhida pela instrumentação instalada a bordo.

Assim, existirá comunicação sem fios que deverá ser assegurada de forma a que não haja interferência (Fig. 3.26). Para tal, as frequências de comunicação a utilizar não deverão estar próximas. Por outro, não deverão ser múltiplas umas das outras, no sentido de evitar interferência.

Na Tabela 3.8 encontram-se sumariadas as frequências utilizadas. Em termos de comunicações por fio, os diferentes elementos/sensores foram ligados diretamente às portas correspondentes do controlador de voo (Fig. 3.27), conforme se resume na Tabela 3.9.

Na Fig. 3.28 representa-se a ligação dos diferentes componentes ao controlador de voo.

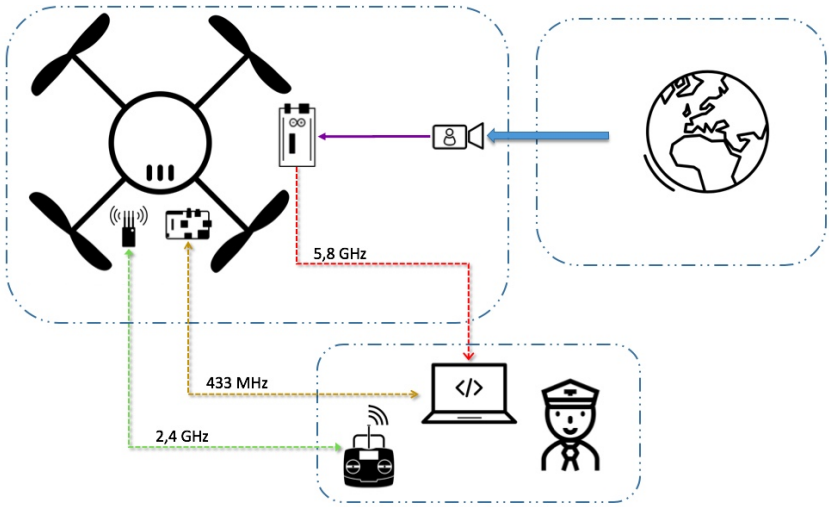


Figura 3.26: Representação esquemática das comunicações sem fios.

Tabela 3.8: Frequências utilizadas para comunicação sem fios.

Porta	Descrição
Radiocontrole	2,4 GHz
Telemetria	433 MHz
Transmissão de vídeo	5,8 GHz

Tabela 3.9: Ligações por cabo ao controlador HKPilot 32.

Porta	Descrição
1	Recetor rádio Spektrum Satellite
2	On screen display
3	Módulo de telemetria 433 MHz
4	Ligação USB para PC
5	—
6	Alimentação
7	Besouro
8	—
9	Unidade GPS
10	—
11	Bússola
12	—

3.6 Construção do modelo

Nesta secção apresentam-se algumas etapas da construção e montagem do drone. Na Fig. 3.29 mostra-se a cablagem de potência com as ligações soldadas à placa de PCB,

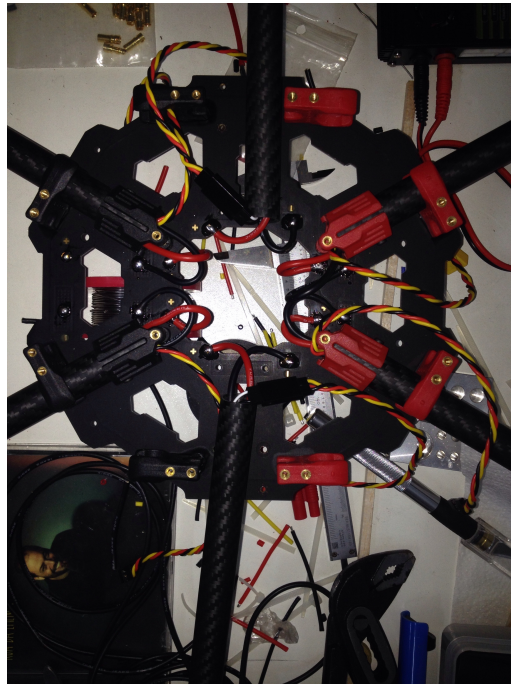


Figura 3.29: Soldadura da cablagem de potência e passagem de cabos de sinal.

A Fig. 3.30 ilustra o posicionamento de um ESC, colocado na parte inferior do extremo do braço, no lado oposto ao motor. Deste modo, foi possível minimizar a distância de cabo entre os ESCs e os motores.

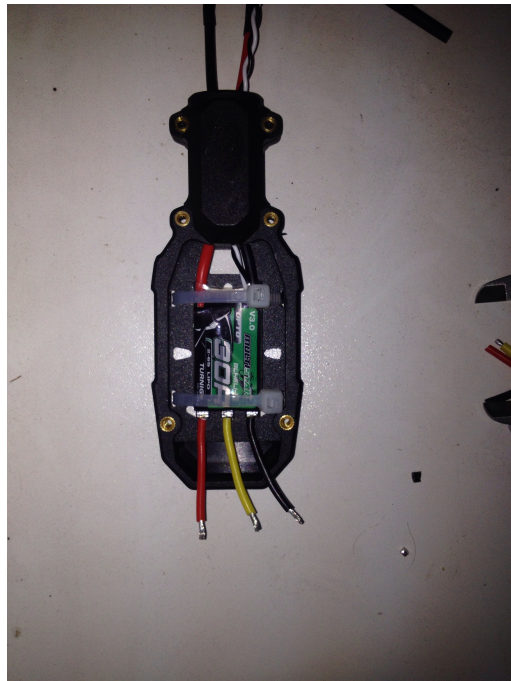


Figura 3.30: Posicionamento dos ESCs na parte inferior dos braços, por baixo dos motores.

Na Fig. 3.31 apresenta-se a instalação de um motor, bem como as respetivas ligações ao ESC (não visível, na parte inferior).

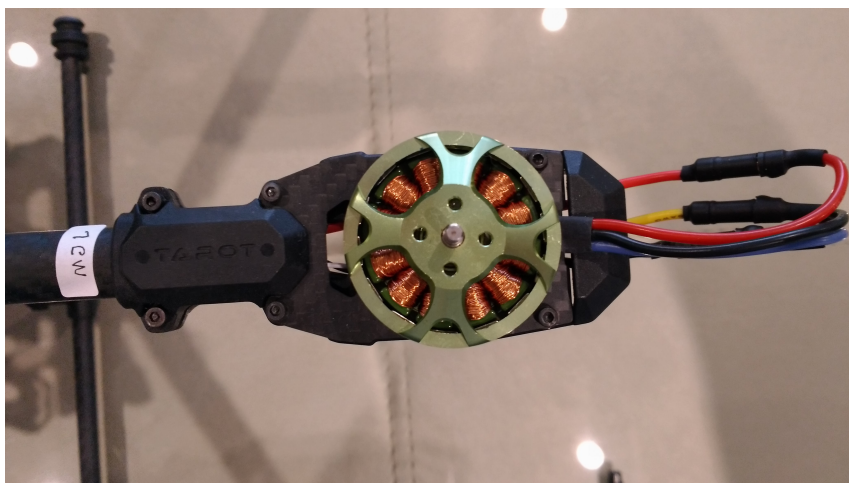


Figura 3.31: Posicionamento e ligação dos motores.

Na Fig. 3.32 pode ver-se a estrutura completa, já com motores, ESCs e estabilizador de imagem, ainda sem a eletrónica instalada.



Figura 3.32: Visão geral do drone sem eletrónica.

A Fig. 3.33 evidencia a montagem final, com a eletrónica instalada para testes elétricos, utilizando *breadboard* para permitir ensaios de forma prática.

Na Fig. 3.34 mostra-se a montagem final, com o drone pronto a voar.

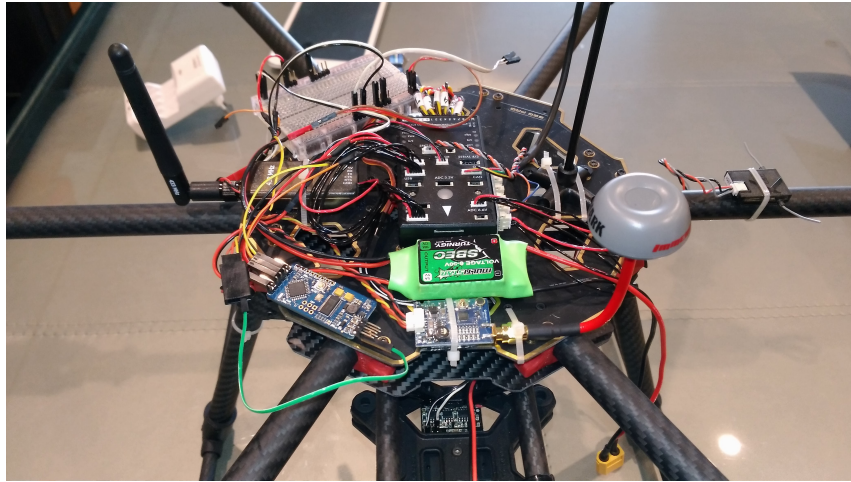


Figura 3.33: Vista geral dos sistemas de comunicação.



Figura 3.34: Drone completo e pronto a voar.

Capítulo 4

Software de comando

Neste capítulo descreve-se o processo de seleção do software usado para a estação de terra e para o controlo do drone. Assim, numa primeira fase, começa-se por considerar as características principais que o software a usar deve possuir, tendo em conta os objetivos a alcançar. Numa segunda fase, apresenta-se o software escolhido e refere-se o processo de configuração dos parâmetros mais importantes.

4.1 Seleção de software da estação de controlo de terra

O software de estação de terra deverá permitir executar funções em três áreas distintas:

1. Configuração – configurar o controlador de voo e calibrar toda a instrumentação existente a bordo do drone;
2. Planeamento – planear um conjunto de eventos, pontos de referência e trajetórias, que permitam a execução de um voo autónomo desejado;
3. Comunicação – permitir a conexão sem fios entre a estação de terra e o veículo, de modo a ser possível a receção de informação proveniente da instrumentação a bordo, bem como o envio de instruções a serem executadas pelo controlador do drone.

Existem diferentes soluções de software proprietário, destinado a trabalhar com uma marca específica de equipamento. Um exemplo relevante é o *DJI Ground Station Software* (Fig. 4.1), que pode ser instalado em PCs Windows ou em iPad.

Em 2016 a empresa DJI descontinuou o *Ground Station Software* para PCs, tendo surgido no mercado como alternativa o UgCS, disponível em <https://www.ugcs.com/en/page/download> (Fig. 4.2).

O UgCS tem a vantagem de poder ser instalado em Windows, MacOS e Linux. Contudo, para além de ser código fechado, tem um custo associado da ordem dos 500 €.

Seguindo a linha de orientação subjacente à seleção do hardware, procurou-se escolher e utilizar um software de código aberto, por um lado, facilmente configurável e, por outro, capaz de ser



Figura 4.1: *DJI Ground Station Software.*



Figura 4.2: Planeamento de trajetória com UgCS.

utilizado com o maior número possível de componentes de hardware. Para além disso, poder ser instalado em quaisquer dos sistemas operativos mais comuns: Windows, MacOS e Linux.

Com estas características, perfilaram-se duas soluções alternativas:

1. *APM Planner* (<http://ardupilot.org/planner2/>);
2. *QGround Control* (<http://qgroundcontrol.com/>).

Os dois programas são bastante similares. Porém, pela facilidade de instalação e configuração, optou-se por utilizar o *APM Planner* (Fig. 4.3). Este software será apresentado com algum detalhe

nas secções seguintes.

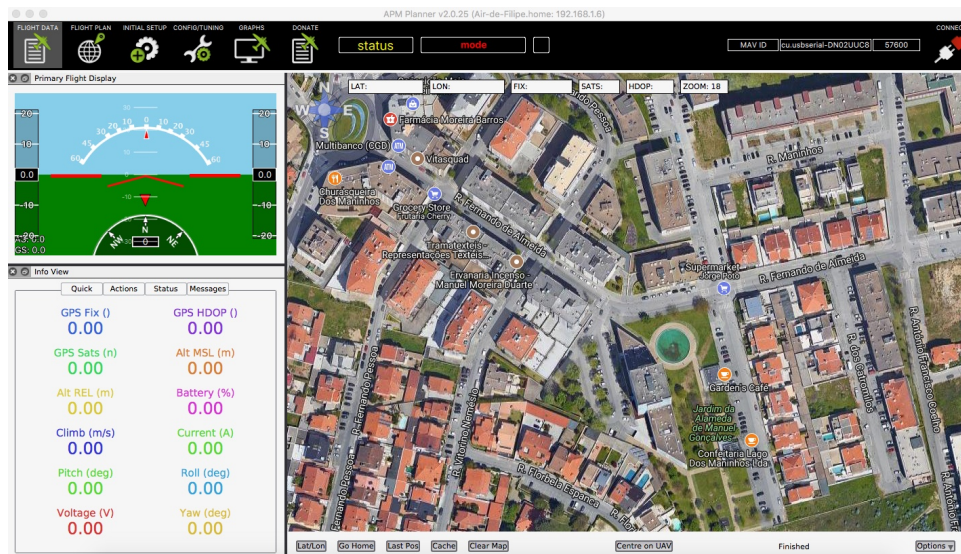


Figura 4.3: Menu inicial do APM Planner 2.0.

4.2 APM Planner 2.0

Para avaliar o funcionamento do APM Planner 2.0 em diferentes sistemas operativos, o software foi instalado e testado num MacBook Air, com as características:

- sistema operativo – macOS High Sierra 10.13.6;
- ram – 8 Gb;
- cpu – Intel core i5 1,6 GHz;
- ano – 2012.

e num PC Samsung com as características:

- sistema operativo – Windows 10;
- ram – 8 Gb;
- cpu – Intel core i5 1,6 GHz;
- ano – 2012.

A instalação do APM Planner 2.0 é bastante simples e segue o esquema normal de qualquer outro software. A versão para Windows usa um ficheiro de instalação executável .EXE e necessita de 300 Mb de espaço disponível em disco, bem como da aplicação .NET previamente instalada. A versão para macOS usa o formato de ficheiro .dmg que, depois de aberto, permite a instalação

bastando “arrastar” a aplicação para a pasta respetiva. Depois de instalado, necessita dos mesmos 300 Mb de espaço no disco rígido.

Não havendo grandes diferenças de funcionamento em ambos os sistemas, optou-se por efetuar a configuração e parametrização final, bem como os voos de teste do drone, no computador Samsung, com o sistema operativo Windows 10.

4.2.1 Informação do menu principal

Ao iniciar o software é apresentado o menu *Flight Data* com um interface constituído por quatro áreas distintas (Fig. 4.4).

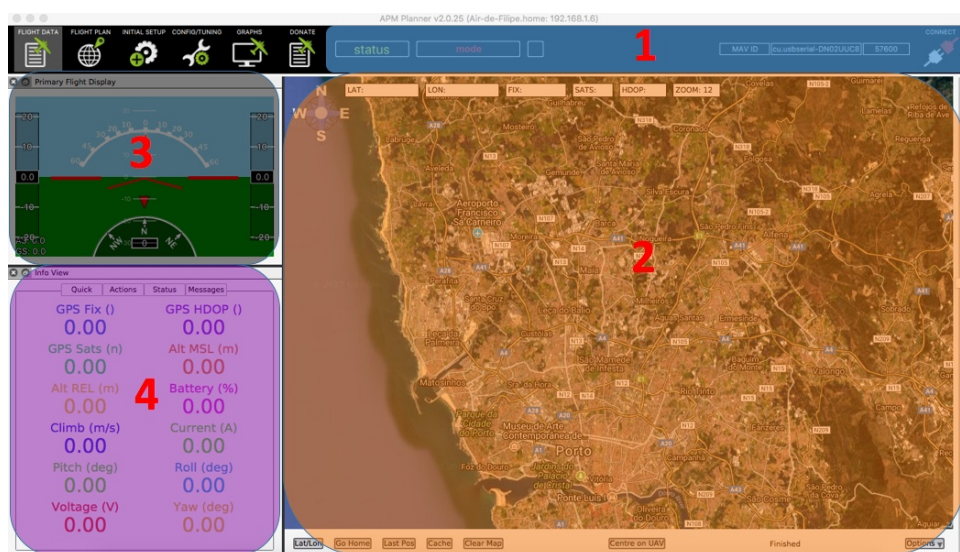


Figura 4.4: Áreas do menu principal do *APM Planner 2.0*.

Nas diferentes áreas tem-se a seguinte informação:

- 1 – indicação do estado da comunicação entre o drone e a estação de terra, modo de voo atual;
- 2 – mapa do Google com indicação da localização do drone e a sua trajetória;
- 3 – horizonte virtual com indicação de velocidade horizontal e altitude;
- 4 – indicação numérica dos valores do item 3 e, adicionalmente, velocidade vertical, estado do GPS, estado da bateria e consumo dos motores.

Para que o sistema funcione é necessário configurar adequadamente o controlador de voo, instalando para esse efeito o software de baixo nível na memória EPROM do controlador que irá controlar o respetivo hardware específico.

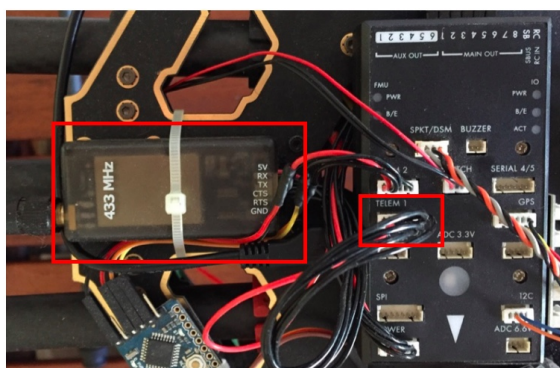


Figura 4.6: Ligação do APM Planner 2.0 ao Pixhawk por radio frequência 433 MHz.

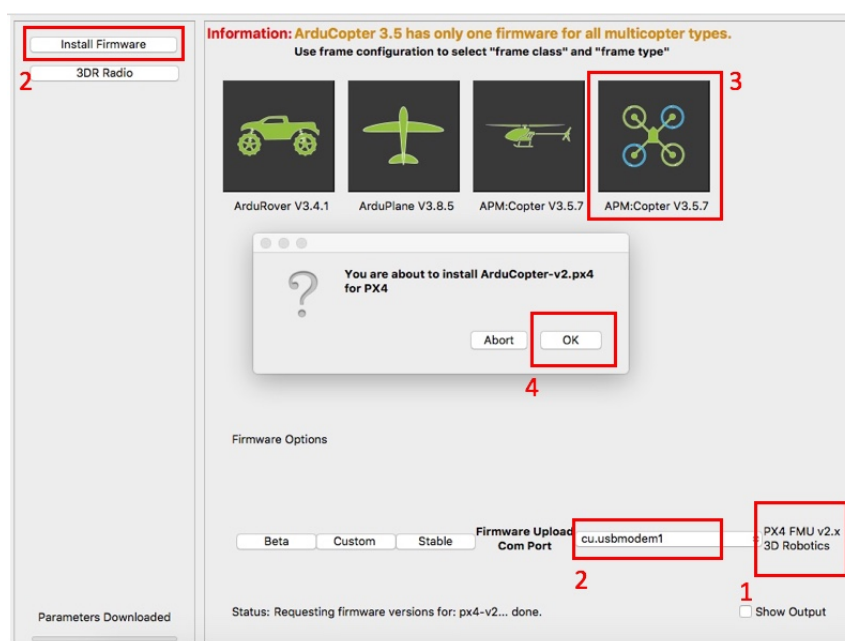


Figura 4.7: Instalação do *firmware* no Pixhawk via USB.

3. verificar que o modelo do controlador detetado é o correto;
4. seleccionar a configuração adequada do modelo: multi rotor;
5. seleccionar: OK.

No final, basta seguir as indicações apresentadas no ecrã e a instalação do *firmware* será concluída em poucos minutos (Fig. 4.8).

4.2.3 Configuração da geometria do drone

Seguidamente é necessário seleccionar o tipo de plataforma multi rotor. O modelo que está a ser usado é constituído por seis motores dispostos em forma de \times , sendo que os motores rodam

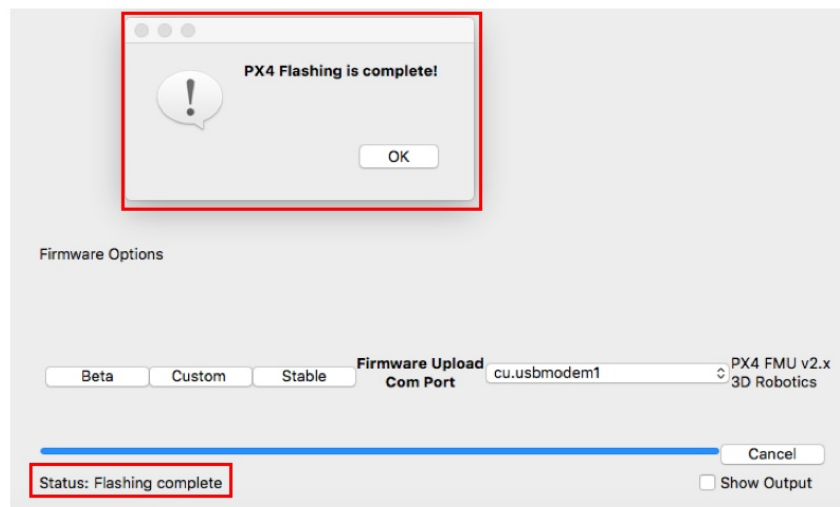


Figura 4.8: Instalação do *firmware* concluída.

no sentido horário e anti horário alternadamente (Fig. 4.9).



Figura 4.9: Configuração do frame e motores.

Deste modo, seleciona-se no software o tipo de configuração adequada (Fig. 4.10).

4.2.4 Inicialização do rádio e da IMU

De seguida é necessário efetuar a inicialização do emissor de rádio, que irá permitir o envio de comandos do utilizador para o drone. Utilizou-se um emissor rádio e um recetor com as características resumidas na Tabela 4.1.

O *APM Planner* utiliza um intervalo de valores PWM para envio dos comandos do radio transmissor para o controlador de voo, admitindo valores entre 1100 e 1900. Assim, à posição

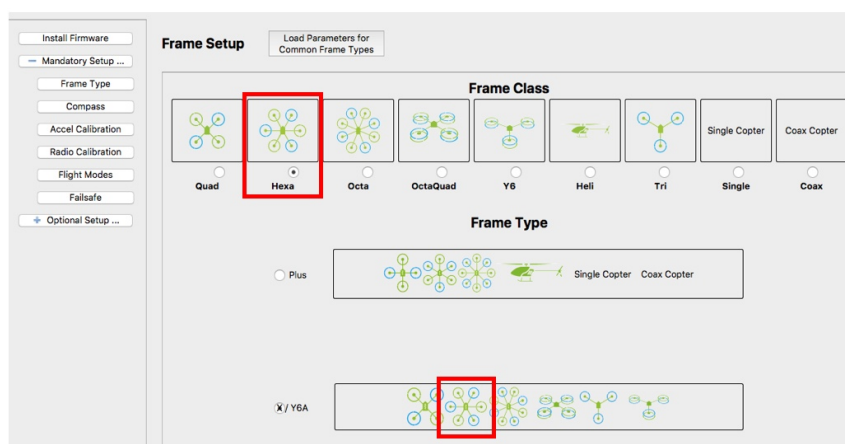


Figura 4.10: Configuração do tipo de drone no *APM Planner*.

Tabela 4.1: Características do conjunto transmissor/recetor.

Especificação	Valor
Transmissor	Spektrum
Modelo	DX6
Canais	6
Frequência	2,4 GHz
Recetor	DSMX Remote Satellite

do comando no extremo inferior corresponderá um sinal PWM de 1100. Ao extremo oposto corresponderá um valor PWM de 1900. O emissor rádio tem seis canais, dos quais quatro *joysticks*, responsáveis pela atitude, rolamento, deriva e motor (que corresponde a movimento vertical no caso dos multi rotores), (Fig. 4.11). Os restantes dois canais correspondem a *micro switches* configuráveis. Essa configuração efetua-se no menu *calibrate* do transmissor (Fig. 4.12).

Na tabela 4.2 apresentam-se os valores configurados no transmissor e os respetivos efeitos provocados no comportamento do drone.

Tabela 4.2: Atribuição de valores PWM aos canais do transmissor.

Canal	Gama	Efeito	Gama	Efeito
1	1500 a 1100	movimento descendente	1500 a 1900	movimento ascendente
2	1500 a 1100	deriva à esquerda	1500 a 1900	deriva à direita
3	1500 a 1900	movimento de avanço	1500 a 1100	movimento de recuo
4	1500 a 1100	movimento à esquerda	1500 a 1900	movimento à direita
5	1700	estabilização	1250	regresso ao ponto de descolagem



Figura 4.11: Canais do rádio transmissor.

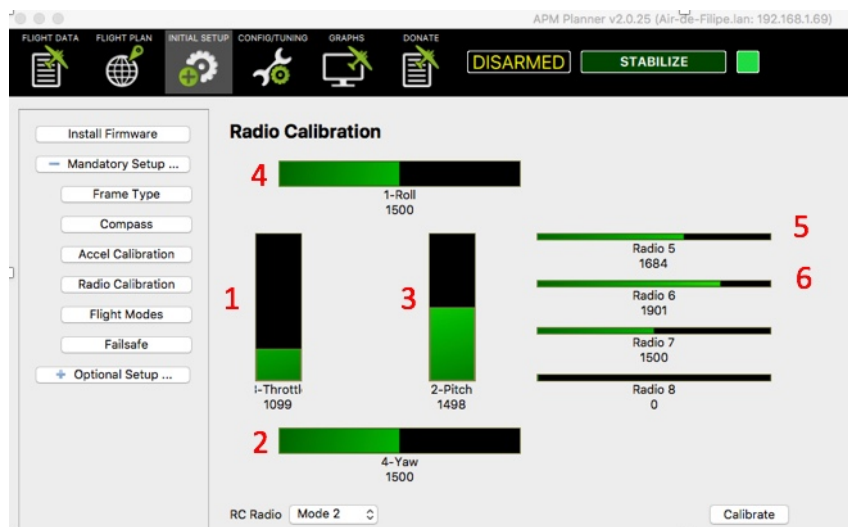


Figura 4.12: Atribuição de canais do transmissor.

Finalmente, deve efetuar-se a inicialização da IMU, correspondente à bússola e ao acelerómetro, seguindo as instruções específicas do software no menu respetivo (Fig. 4.13).

Após esta configuração inicial é possível realizar voo controlado pelo operador utilizando o transmissor de rádio. Também é possível definir uma missão pré-programada no *APM Planner*, descarregá-la para o controlador do drone e executar um voo completamente autónomo. É possível receber na estação de terra informação do drone, como por exemplo, posição, velocidade, altitude

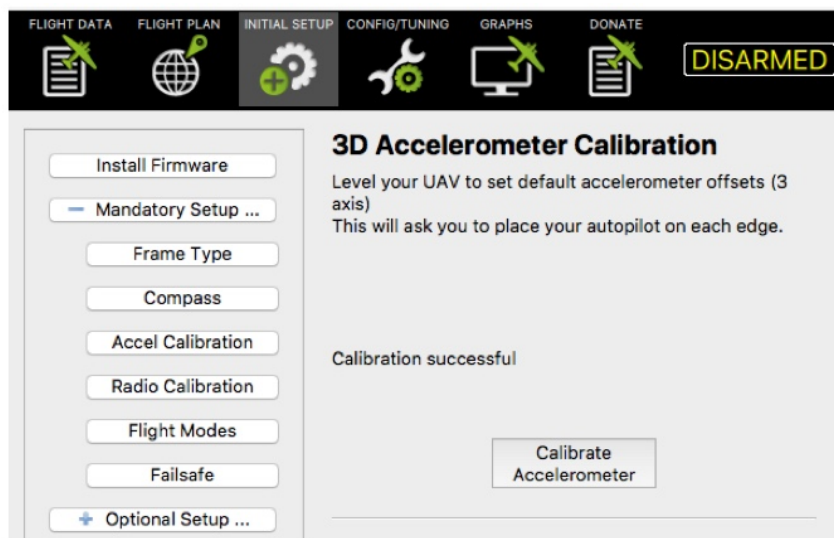


Figura 4.13: Inicialização do acelerómetro.

e carga da bateria, bem como enviar comandos ou alterar parâmetros da missão no decorrer do voo via estação de terra.

Capítulo 5

Testes experimentais

Neste capítulo apresentam-se os principais resultados obtidos nos voos de ensaio. Os testes foram realizados na pista do clube de aerodelismo: Liga de Iniciação e Propaganda Aeronáutica (LIPA), em São Romão de Coronado, Trofa (<http://www.lipa.pt/campovoo/campovoo.html>). Trata-se de um local licenciado e autorizado para a prática de aerodelismo, na qual pode inserir-se o voo com drones. A pista tem 150 m, em tela sobre base compacta, e está enquadrada numa área livre de cerca de 2500 m² (Fig. 5.1).



Figura 5.1: Pista do LIPA.

5.1 Voos de ensaio

Com a configuração do hardware e software devidamente concluídas, realizou-se voo de ensaio utilizando o transmissor rádio, com intervenção direta do operador. Durante o voo foram recebidas informações do drone na estação de terra. De seguida realizou-se voo completamente autónomo, pré-programado a partir da estação de terra.

Na Fig. 5.2 mostram-se os equipamentos utilizados para os voos de ensaio, nomeadamente o drone, o PC com o software da estação de terra, e o emissor rádio.



Figura 5.2: Visão geral dos equipamentos utilizados para a realização dos voos de teste.

5.2 Ensaio com voo radio controlado

O voo foi realizado executando uma trajetória ascendente/descendente entre 0 e cerca de 40 m de altitude relativa. O principal objetivo era testar o correto funcionamento da transmissão de sinal entre o rádio emissor e o recetor. Na Fig. 5.3 pode ver-se a evolução do movimento realizado pelo drone (i.e., subida e descida), juntamente com o registo do consumo de corrente e tensão da bateria, ao longo do tempo. Pode observar-se que a altitude vai variando, pois o objetivo era apenas ganhar alguma sensibilidade em relação ao comportamento do veículo. A tensão e a corrente estão naturalmente relacionadas com a trajetória efetuada que, para além de deslocamento vertical, incluiu movimento no plano ortogonal, não sendo visível no gráfico.

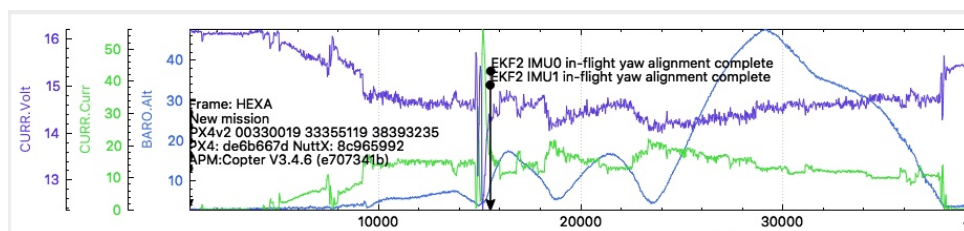


Figura 5.3: Gráfico da altitude do drone, corrente e tensão da bateria em função do tempo.

No sentido de tornar o comportamento do drone mais suave às ações nos *sticks* do comando, ajustaram-se os parâmetros do transmissor rádio no software *APM Planner*, conforme mostrado

na Fig. 5.4. Este ajuste foi realizado por ensaio experimental, recorrendo ao método de tentativa e erro e pode, naturalmente, depender do gosto particular ou da sensibilidade de cada piloto.

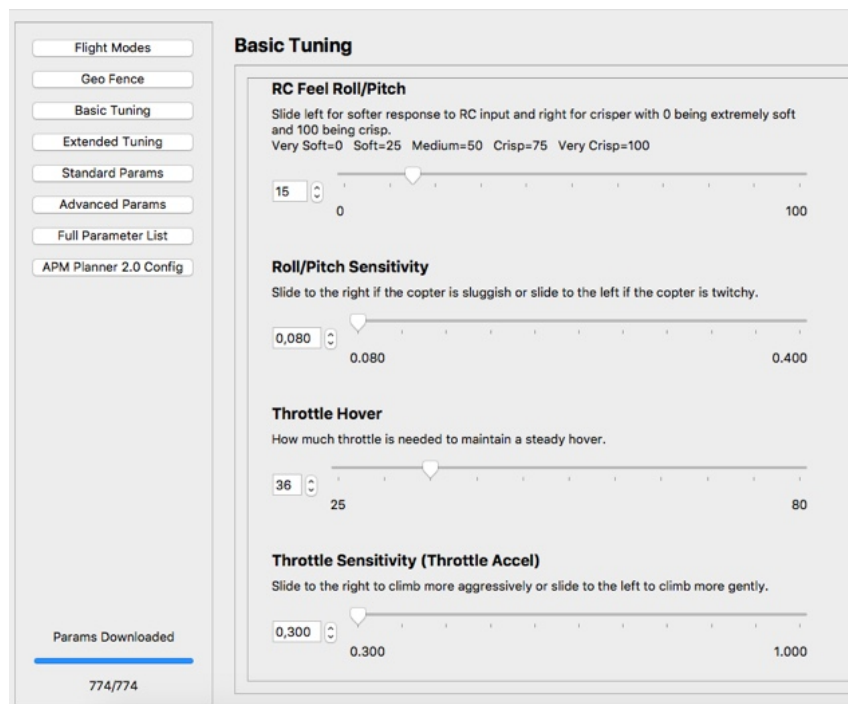


Figura 5.4: Ajuste da sensibilidade de resposta aos comandos do transmissor rádio.

Considera-se, no entanto, que os parâmetros ajustados podem contribuir, na maioria dos casos, para a obtenção de um comportamento suficientemente rápido e, ainda assim, consistente por parte do drone.

5.3 Ensaio com voo autónomo

Os voos autónomos foram planeados e pré-programados na estação de terra. Na Fig. 5.5 é apresentado um exemplo de um plano de voo com cinco instruções:

- definição do ponto de partida – depois da captura do sinal de GPS, a definição da posição de partida é atribuída às coordenadas indicadas no GPS aquando da ativação dos motores;
- descolagem – a primeira instrução de voo é a ordem para descolar até uma determinada altitude;
- pontos de navegação – são definidos um ou mais pontos de navegação, a altitude a que se pretende passar nesses pontos e o grau de precisão com que se pretende atingir cada uma dessas posições;

- regresso ao ponto de partida – o comando de regresso ao ponto de partida dá ordem ao drone para se deslocar em linha reta e a altitude constante, e depois executar um movimento descendente até aterrar.

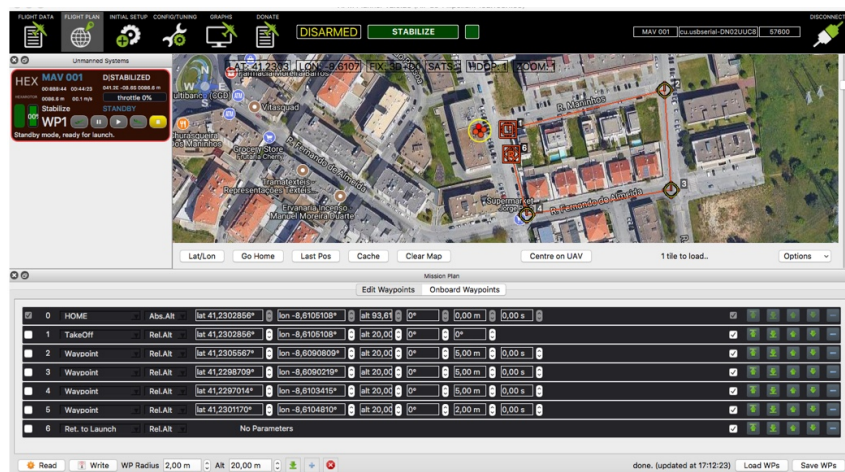


Figura 5.5: Exemplo do planeamento de um voo autónomo na estação de terra.

No caso de operações de busca e salvamento, um plano de voo útil passa pelo varrimento de uma determinada área na qual se pretende fazer uma busca, permitindo que o drone controle e execute todas as operações relacionadas com o voo (Fig. 5.6). Assim, o operador está liberto para outras tarefas como, por exemplo, monitorizar as imagens aéreas obtidas por uma câmara termográfica embarcada.

O voo autónomo de teste iniciou-se com o drone pousado e com os motores parados. Após decolagem, o veículo executou o voo programado. No gráfico da Fig. 5.7 apresenta-se a variação da altitude, destacando-se as seguintes fases:

1. decolagem com subida a 5 m de altitude relativa;
2. pairado a 5 m de altitude relativa (Fig. 5.8);
3. subida a velocidade constante até 40 m de altitude relativa;
4. pairado a 40 m de altitude relativa (Fig. 5.9);
5. descida a velocidade elevada até 15 m de altitude relativa;
6. descida a velocidade lenta, limitada para garantir uma aterragem suave.

Como se verifica da Fig. 5.7, existe um *overshoot* imediatamente após a decolagem, devido ao ganho do controlador PID estar demasiado elevado. No restante movimento o drone tem um comportamento dentro do expectável e com resultados bastante estáveis e precisos.



Figura 5.6: Exemplo do planeamento de varrimento de uma área.

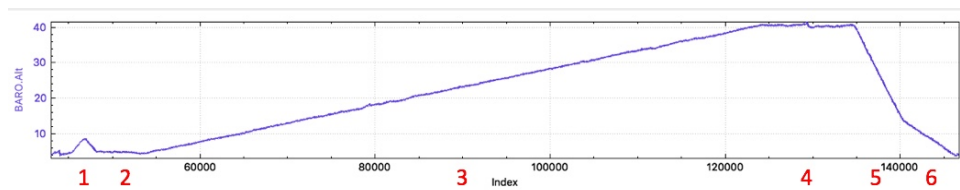


Figura 5.7: Gráfico da variação da altitude em voo completamente autónomo.

Por esse motivo, e após um processo de várias iterações e testes experimentais, afinaram-se os PIDs responsáveis pela atitude, rolamento e deriva, com os valores indicados na Fig. 5.10, sendo certo que estes não garantem que o comportamento é ótimo.

Os teste efetuados permitem concluir que o drone pode cumprir os objetivos delineados para as missões de busca e salvamento. Porém, mais experiências são necessárias para confirmar a robustez do sistema, nomeadamente em condições mais próximas de situações reais.

Uma vez que o software e o hardware de controlo são ambos de código aberto, estes e outros parâmetros estão facilmente acessíveis ao operador, pelo que poderão ser alterados em função dos resultados específicos que se pretenderem obter.

Finalmente, na Fig. 5.11 apresenta-se um exemplo de exportação para o Google Earth dos dados registados e transmitidos para a estação de terra pelo GPS.



Figura 5.8: Voo pairado a 5 m de altitude.



Figura 5.9: Voo pairado a 40 m de altitude.

The screenshot displays a flight control interface with various PID parameters. A red box highlights the 'Lock Pitch and Roll Values' section, which includes the following parameters:

Parameter	Rate Roll	Rate Pitch	Rate Yaw
P	0,1350	0,1350	0,1800
I	0,0900	0,0900	0,0180
D	0,0036	0,0036	0,0000
I_MAX	0,50	0,50	0,50
Filter	20 Hz	20 Hz	2 Hz

Other visible parameters include:

- Horizontal Velocity:** P 1,0000, I 0,5000, I_MAX 1000,00, Filter 5 Hz.
- Vertical Acceleration:** P 0,5000, I 1,0000, D 0,0000, I_MAX 800,0000, Filter 20 Hz.
- Vertical Position:** P 1,0000.
- Vertical Velocity:** P 5,0000.
- WPNav (cm/s):** Speed 500, Radius 200, Speed Up 250, speed Dow 150, Loiter Spet 500.
- Ch6 Opt:** CH6_NONE, Min 0,0000, Max 0,0000.
- Ch7 Opt:** Do nothing.
- Ch8 Opt:** Do nothing.

Buttons at the bottom: Write Params, Refresh Params.

Figura 5.10: Valores parametrizados para os PIDs da atitude, rolamento e deriva.

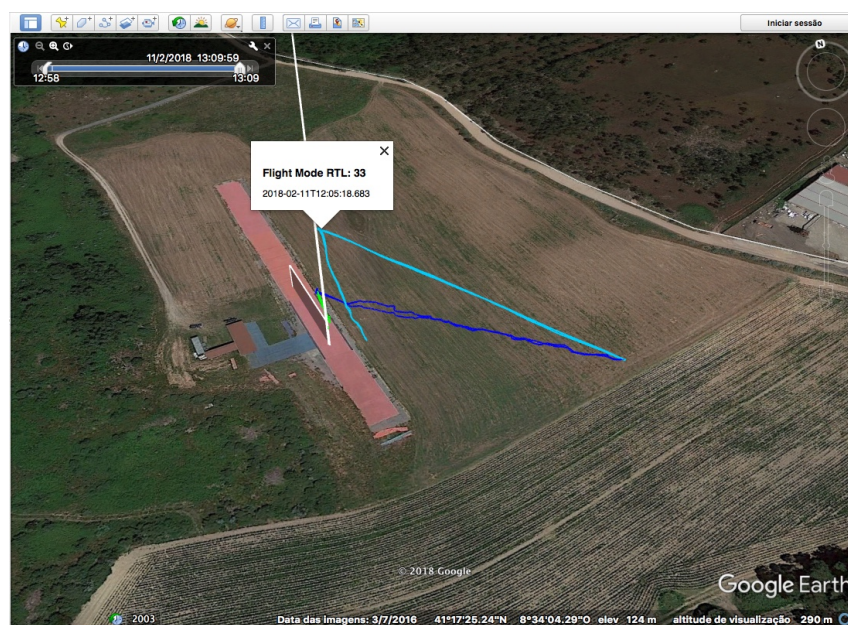


Figura 5.11: Exemplo de uma trajetória no Google Earth.

Capítulo 6

Conclusão e trabalhos futuros

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões que decorrem da realização deste trabalho, mencionando-se também alguns possíveis desenvolvimentos futuros.

6.1 Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvida uma aeronave não tripulada baseada em drone, vocacionada para missões de busca e salvamento. O sistema apresenta baixo custo e elevada capacidade de resposta, possuindo uma autonomia de voo razoável e uma reduzida necessidade de supervisão por parte do operador. Ou seja, este não necessita de controlar o movimento do drone, ficando liberto para intervir no planeamento da missão, na interpretação da informação recolhida pelo veículo e no processo de tomada de decisão.

Numa primeira fase do trabalho, foi efetuada uma especificação dos requisitos necessários para o cumprimento das missões. Assim, foi definida a plataforma de voo a usar, o número de motores e a sua configuração e, tendo em conta as especificações iniciais e uma estimativa da carga a transportar pelo drone, foi efetuado o dimensionamento dos motores. Numa segunda fase, adotou-se um processo iterativo para chegar à solução final, pois uma decisão de escolha de um elemento tem implicações nas características dos restantes. Nesta etapa, foram também escolhidos o sistema de controlo de voo, a comunicação e a interface com o utilizador. Numa terceira fase, após avaliação de diferentes alternativas, foi selecionado e parametrizado o software de comando. Finalmente, numa última fase, o sistema foi testado e avaliado experimentalmente.

Os teste efetuados permitiram concluir que a solução desenvolvida cumpre os objetivos delineados, sendo de baixo custo, flexível, modular e expansível. Apesar dos bons resultados obtidos, alguns desenvolvimentos poderão ser efetuados no sentido de melhorar o sistema desenvolvido.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Tal como referido, o sistema provou ser capaz de cumprir os objetivos de realização de missões autónomas pré-programadas, vocacionadas para busca e salvamento de pessoas. Para tal, um as-

peto relevante é a capacidade de transmissão de dados para a estação de terra, para processamento e tomada de decisão local. Porém, para melhor testar a fiabilidade do sistema, mais experiências são necessárias, nomeadamente em condições mais próximas de situações reais.

A recolha, transmissão e processamento de imagem será um dos principais objetivos das missões a efetuar, pelo que a colocação e teste de câmaras, nomeadamente de infra-vermelho, deverá ser um dos primeiros desenvolvimentos futuros.

Ao nível da estrutura, poderá ser interessante projetar e construir uma blindagem, de modo a proteger a aeronave de condições meteorológicas adversas (e.g., chuva e neve), bem como conferir-lhe alguma robustez face a aterragens deficientes.

Seria também importante definir e implementar procedimentos para situações de emergência (e.g., bateria fraca, problemas de comunicação com a estação de terra, perda de um rotor e colisões).

De modo a explorar as características de flexibilidade, modularidade e expansibilidade da solução desenvolvida, o maior desafio poderá passar pela instalação *on board* de um computador (e.g., um Raspberry PI) capaz de processar informação diversa e tomar decisões em tempo real, sem intervenção da estação de terra. Essa linha de trabalho possibilitaria dotar o sistema de mais inteligência e, eventualmente, da capacidade de aprendizagem.

Bibliografia

- Allen, J. e Walsh, B. (2008). Enhanced oil spill surveillance, detection and monitoring through the applied technology of unmanned air systems. Em *International Oil Spill Conference*, volume 2008, pgs. 113–120. American Petroleum Institute.
- Arjomandi, M., Agostino, S., Mammone, M., Nelson, M., e Zhou, T. (2006). Classification of unmanned aerial vehicles. *Mechanical Engineering*, 3016.
- Aslam, M. W. (2011). A critical evaluation of American drone strikes in Pakistan: legality, legitimacy and prudence. *Critical Studies on Terrorism*, 4(3):313–329.
- Autoridade Nacional de Proteção Civil (2017). *Plano de Atividades 2017*. ANPC.
- Bonabeau, E. e Meyer, C. (2001). Swarm intelligence: A whole new way to think about business. *Harvard business review*, 79(5):106–115.
- Brooke-Holland, L. (2012). Unmanned Aerial Vehicles (drones): an introduction. *UK House of Commons Library Report, Standard Note SN06493 (25 April 2013)*.
- Bürkle, A., Segor, F., e Kollmann, M. (2011). Towards autonomous micro uav swarms. *Journal of intelligent & robotic systems*, 61(1-4):339–353.
- Cantero, A., Gallego, D., López, P., Molina, R., Sánchez, G., Sueldo, A., Guerrero, A., e Guillaumon Grabolosa, A. (2015). A drone based system for surveillance applications in coastal zone. *Instrumentation Viewpoint*, (18):64–64.
- Chabot, D. (2018). Trends in drone research and applications as the Journal of Unmanned Vehicle Systems turns five. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 6(1):vi–xv.
- Chalupníčková, H., Bahenskỳ, P., Sỳkora, V., e Heralová, D. (2014). The use of drones in air cargo transportation. *Economy & Society & Environment*, 4509:1–6.
- Chao, H., Cao, Y., e Chen, Y. (2010). Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 8(1):36–44.
- Cho, K., Cho, M., e Jeon, J. (2017). Fly a drone safely: Evaluation of an embodied egocentric drone controller interface. *Interacting With Computers*, 29(3):345–354.

- Custers, B. (2016). *Future of Drone Use*. Springer.
- Daftry, S., Hoppe, C., e Bischof, H. (2015). Building with drones: Accurate 3d facade reconstruction using mavs. Em *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pgs. 3487–3494. IEEE.
- Duening, T. (2015). A Hot Seller in a Hot Market: Meet the World’s Most Successful Seller of Drones. <http://www.forbes.com/sites/tomduening/2015/01/21/a-hot-seller-in-a-hot-market-meet-the-worlds-most-successful-seller-of-drones/#2f83957f29ed>.
- Erbil, M. A., Prior, S. D., Karamanoglu, M., Odedra, S., Barlow, C., e Lewis, D. (2009). Reconfigurable unmanned aerial vehicles. Em *Proceedings of the International Conference on Manufacturing and Engineering Systems*, pgs. 392–396. International Conference on Manufacturing and Engineering Systems.
- Floreano, D., Mintchev, S., e Shintake, J. (2017). Foldable drones: from biology to technology. Em *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication 2017*, volume 10162, pg. 1016203. International Society for Optics and Photonics.
- Guerriero, F., Surace, R., Loscri, V., e Natalizio, E. (2014). A multi-objective approach for unmanned aerial vehicle routing problem with soft time windows constraints. *Applied Mathematical Modelling*, 38(3):839–852.
- Hassanalian, M. e Abdelkefi, A. (2017a). Classifications, applications, and design challenges of drones: a review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91:99–131.
- Hassanalian, M. e Abdelkefi, A. (2017b). Design, manufacturing, and flight testing of a fixed wing micro air vehicle with zimmerman planform. *Meccanica*, 52(6):1265–1282.
- Hassanalian, M., Radmanesh, M., e Ziaei-Rad, S. (2012). Sending instructions and receiving the data from MAVs using telecommunication networks. Em *Proceeding of the International Micro Air Vehicle Conference (IMAV2012)*, pgs. 3–6.
- Henderson, L. e Kuester, F. (2018). Adaptive design and optimization of a shape-changing drone. Em *2018 IEEE Aerospace Conference*. IEEE.
- Heutger, M. e Kückelhaus, M. (2014). Unmanned aerial vehicle in logistics: a DHL perspective on implications and use cases for the logistics industry. *DHL Customer Solutions & Innovation, Troisdorf, Germany*.
- Hoffmann, G. M., Huang, H., Waslander, S. L., e Tomlin, C. J. (2011). Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed. *Control Engineering Practice*, 19(9):1023–1036.
- Hsu, V., Kahn, J. M., e Pister, K. S. (1998). *Wireless communications for smart dust*. Electronics Research Laboratory, College of Engineering, University of California.

- Kendoul, F. (2012). Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems. *Journal of Field Robotics*, 29(2):315–378.
- LaFleur, K., Cassady, K., Doud, A., Shades, K., Rogin, E., e He, B. (2013). Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain–computer interface. *Journal of Neural Engineering*, 10(4):046003.
- Lee, T., Jang, S., Jeong, M., e Cho, D.-I. D. (2016). Allometric scaling of insects and animals for biomimetic robot design considerations. Em *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pgs. 1541–1546. IEEE.
- Luppichini, R. e So, A. (2016). A technoethical review of commercial drone use in the context of governance, ethics, and privacy. *Technology in Society*, 46:109–119.
- Machado, J. T. e Lopes, A. M. (2015). The persistence of memory. *Nonlinear Dynamics*, 79(1):63–82.
- Merino, L., Caballero, F., Martinez-de Dios, J., e Ollero, A. (2005). Cooperative fire detection using unmanned aerial vehicles. Em *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005*, pgs. 1884–1889. IEEE.
- Mohammed, S. S., Ramasamy, K., Shanmuganantham, T., et al. (2010). Wireless power transmission—a next generation power transmission system. *International Journal of Computer Applications*, 1(13):100–103.
- Palattella, M. R., Accettura, N., Vilajosana, X., Watteyne, T., Grieco, L. A., Boggia, G., e Dohler, M. (2013). Standardized protocol stack for the internet of (important) things. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3):1389–1406.
- Pergola, P. e Cipolla, V. (2016). Mission architecture for Mars exploration based on small satellites and planetary drones. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 4(3):142–162.
- Petricca, L., Ohlckers, P., e Grinde, C. (2011). Micro-and nano-air vehicles: State of the art. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011.
- Reineman, B. D., Lenain, L., Statom, N. M., e Melville, W. K. (2013). Development and testing of instrumentation for UAV-based flux measurements within terrestrial and marine atmospheric boundary layers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(7):1295–1319.
- Restas, A. (2015). Drone applications for supporting disaster management. *World Journal of Engineering and Technology*, 3(03):316.
- Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. Em *ACM SIGGRAPH computer graphics*, volume 21, pgs. 25–34. ACM.

- Santoso, F., Garratt, M. A., e Anavatti, S. G. (2017). Visual–inertial navigation systems for aerial robotics: Sensor fusion and technology. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 14(1):260–275.
- Sato, H. e Maharbiz, M. M. (2010). Recent developments in the remote radio control of insect flight. *Frontiers in neuroscience*, 4:199.
- Schmidt, D. K., Zhao, W., e Kapania, R. K. (2016). Flight-Dynamics and Flutter Modeling and Analyses of a Flexible Flying-Wing Drone-Invited. Em *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, pg. 1748.
- Sekander, S., Tabassum, H., e Hossain, E. (2018). Multi-tier drone architecture for 5G/B5G cellular networks: Challenges, trends, and prospects. *IEEE Communications Magazine*, 56(3):96–103.
- Shrestha, B., Saxena, N., Truong, H. T. T., e Asokan, N. (2014). Drone to the rescue: Relay-resilient authentication using ambient multi-sensing. Em *International Conference on Financial Cryptography and Data Security*, pgs. 349–364. Springer.
- Smith, I. S. e Cutts, J. A. (1999). Floating in space. *Scientific American*, 281(5):98–103.
- Smith, M. L. (2015). Regulating Law Enforcement’s Use of Drones: The Need for State Legislation. *Harvard Journal on Legislation*, 52:423–454.
- Song, Y. (2002). *Optical Communication Systems for Smart Dust*. PhD thesis, Virginia Tech.
- Tang, L. e Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4):791–797.
- Valavanis, K. P. (2008). *Advances in unmanned aerial vehicles: state of the art and the road to autonomy*, volume 33. Springer Science & Business Media.
- Veroustraete, F. (2015). The rise of the drones in agriculture. *EC Agriculture*, 2:325–327.
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., e Hinkley, E. A. (2012). Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4(6):1671–1692.